

Jarkko Avikainen

Sähkönjakeluverkon puupylväiden lahoaminen eri ympäristöissä

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 20. huhtikuuta 2015.

Työn valvoja:

Professori Matti Lehtonen

Työn ohjaaja:

Professori Matti Lehtonen



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Tekijä: Jarkko Avikainen		
Työn nimi: Sähkönjakeluverkon puupylväiden lahoaminen eri ympäristöissä		
Päivämäärä: 20.04.2015	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 7+72
Sähkötekniikan laitos		
Professori: Sähköjärjestelmät		Koodi: S-18
Valvoja: Prof. Matti Lehtonen		
Ohjaaja: Prof. Matti Lehtonen		
<p>Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää ympäristön vaikutusta puupylväiden lahoamiseen. Tutkimuksen kohteiksi valittiin maaperän, perustustavan sekä paikkakunnan vaikutus sähkönjakeluverkon puupylväiden lahoamiseen. Tutkimuksen aineisto käsitti noin 9000 lahoisuustarkastetun CCA-kyllästeisen puupylvään tiedot Loiste Sähköverkon alueelta.</p> <p>Tutkimus suoritettiin laskemalla ja vertailemalla maaperien, perustustapojen sekä paikkakuntien suhteellisia lahoamisnopeuksia. Lopuksi piirrettiin keskimääräisen pylvään rappeutumiskäyrät eri maaperien ja perustustapojen mukaan. Rappeutumiskäyrät muodostettiin käyttäen hyväksi saatuja suhteellisia lahoamisnopeuksia, aineiston ikätietoja sekä eksponentiaalisten ja lineaaristen käyrien muotoja.</p> <p>Tuloksina löydettiin merkittäviä eroja tarkasteltavien ympäristötekijöiden välillä. Puupylväät lahosivat maaperää tarkasteltaessa nopeimmin multamaassa. Ne lahosivat noin 1,5 kertaa nopeammin kuin hitaimmin lahoavassa kalliomaassa. Muissa maaperissä lahoaminen oli välillä 1,18–1,26 kertaa nopeampaa kuin kalliomaassa. Tulokset ovat samansuuntaiset aikaisemman kokemuksen ja tutkimuksen kanssa. Luotettavuusanalyysi tehtiin Kruskal-Wallis testillä, jonka mukaan tulokset ovat tilastollisesti merkitseviä. Tuloksia voidaan siis pitää luotettavina.</p> <p>Perustustapojen lahoamisnopeuksissa oli myös suuria eroja. Nopeimmin lahosivat taajama-, pelto-, piha-, ja tieperusteiset pylväät. Metsä-, suo- ja kallioperusteiset pylväät lahosivat hitaimmin.</p> <p>Paikkakuntien välillä havaittiin myös suuria eroja. Kajaanin alueella pylväät lahosivat nopeimmin ja hitaimmin Hyrynsalmella. Erot johtunevat ilmastollisista eroista ja vesistöiden laajuudesta paikkakunnittain, joilla onkin suuri rooli lahon menestymisessä.</p> <p>Tutkimuksen avulla voidaan ajoittaa ja kohdistaa lahoisuustarkastukset tarkemmin ja tehostaa sähkönjakeluverkon suunnittelua, kun tiedetään missä ympäristöissä pylväät lahoavat nopeimmin. Näin pylväiden huolto- ja uusimiskustannukset, sekä asiakkaan kokemat keskeytyskustannukset voivat vähentyä. Ja mikä tärkeintä, työturvallisuus paranee.</p>		
Avainsanat: Sähkönjakeluverkko, puupylväät, lahoisuustarkastus, rappeutuminen		

AALTO UNIVERSITY
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

ABSTRACT OF THE
MASTER'S THESIS

Author: Jarkko Avikainen		
Title: Decay of wooden electricity distribution poles in various environments		
Date: 20.04.2015	Language: Finnish	Number of pages: 7+72
Department of Electrical Engineering		
Professorship: Power Systems		Code: S-18
Supervisor: Prof. Matti Lehtonen		
Advisor: Prof. Matti Lehtonen		
<p>The purpose of this thesis is to determine the impact of different types of soil, foundations and regions on the rate of decay of wooden poles in the region of Loiste Sähköverkko. The data of this study consists of information about 9000 decay-inspected CCA-impregnated wooden poles. The aim of this study is to calculate and compare soils, foundations and regions.</p> <p>The study was performed by calculating the relative speed of decay in the above-mentioned environment factors and comparing the results. Furthermore, the deterioration curves of soils and foundations were drawn by exploiting the results as well as the exponential and linear curve fittings.</p> <p>The results show that there were significant differences between soil, foundations and regions. A wooden pole decayed fastest in a mull soil. Decay was 1.5 times faster than in the slowest one, rock solid soil. In the other soil types, the relative speed of decay was from 1.18 to 1.26 compared to solid rock. A reliability analysis was executed using the Kruskal-Wallis test. The test shows that the results of the soils were statistically significant.</p> <p>The poles decayed fastest in the foundations of arable land, garden or court, urban areas and road areas. In contrast, decay was slower in a forest, swamp, and rock pole foundation. According to regions, poles decayed fastest in Kajaani and slowest in Hyrynsalmi. The difference between the regions was explained by different climates in the regions which has a major role in the growth of decay.</p> <p>The results of this thesis help the distribution company, Loiste Sähköverkko, to time more accurate decay inspections and maintenance operations. Thus, it is possible to reduce maintenance, replacement and customer outage costs.</p>		
Keywords: electricity distribution, wood poles, decay inspection, deterioration		

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty Sähkötietojärjestelmien tutkimusryhmässä Sähkötekniikan laitoksella Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulussa. Tutkimuksen aineisto on saatu Loiste Sähköverkko Oy:ltä.

Haluan kiittää ohjaajaani ja valvojaani professori Matti Lehtosta diplomityön aiheesta sekä erinomaisesti sujuneesta yhteistyöstä. Lisäksi haluan kiittää Loiste Sähköverkko Oy:n DI Jussi Niskasta lisätiedoista aineistoa koskien.

Kiitän perhettäni ja ystäviäni tuesta ja kannustuksesta. Erityiskiitos avovaimolleni Monnalle, jonka kannustus ja tuki auttoivat minua suuresti opintojeni suorittamisessa.

Helsingissä 20.4.2015

Jarkko Avikainen

Sisältö

Tiivistelmä	ii
Abstract	iii
Esipuhe	iv
Sisältö.....	v
Lyhenteet	vii
1 Johdanto	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Tutkimusongelmat	2
1.3 Tutkimuksen tavoite.....	3
1.4 Tutkimuksen rajaukset	3
2 Puuaineksen tuhoutuminen.....	4
2.1 Hyönteiset ja bakteerit	4
2.2 Lahottajasienet	4
2.2.1 Lahottajasienten luokittelu	6
2.3 Lahottajasienten kasvutekijät	7
3 Pylvään tuhoutuminen	9
3.1 Puupylväät Suomessa.....	9
3.2 Puupylvään tuhoutumiseen vaikuttavat tekijät	11
3.3 Lahoamiseen vaikuttavat maaperät ja sijainnit.....	12
3.4 Kyllästeet.....	12
3.4.1 Suolakyllästeet	12
3.4.2 Kreosoottikylläste	13
3.4.3 Kyllästysluokat ja vaatimukset pylväille.....	14
3.4.4 Kyllästysprosessi.....	15
3.5 Puupylväiden lahoaminen	18
3.6 Pylväiden käyttöikä.....	20
3.7 Puupylväiden tulevaisuus	22
4 Tarkastusmenetelmät ja laitteet.....	23
4.1 Tarkastuksessa huomioitavaa	23
4.2 Perinteiset menetelmät	27
4.3 Kehittyneemmät menetelmät.....	33
5 Aineisto ja aikaisempi tutkimus.....	35
5.1 Aineisto	35
5.2 Aikaisempi tutkimus	42
6 Tutkimusmenetelmät ja tulokset	43
6.1 Suhteelliset lahoamisnopeudet	43
6.2 Rappeutumiskäyrät	46
6.2.1 Aineistosta lasketut rappeutumiskäyrät.....	46
6.2.2 Rappeutumiskäyrät koko populaatiolle	49
6.3 Paikkakunnan vaikutus lahoamiseen	51
6.4 Luotettavuusanalyysi	54
7 Johtopäätökset.....	57
8 Yhteenveto	59
Lähteet	61

Liitteet..... 66
 Liite A..... 66
 Liite B 67
 Liite C 68
 Liite D..... 70

Lyhenteet

CCA	Chromated copper arsenate. Kromista, kuparista ja arseenista koostuva kyllästeaine, jota käytetään puun suojaamiseen.
EY	Euroopan yhteisö.
K33	Kemira Oy:n valmistama CCA-kylläste. Ks. CCA.
NDT	Nondestructive testing. Rikkomaton aineenkoetus tarkoittaa tarkastusmenetelmiä, jotka eivät riko tarkasteltavaa kohdetta.
NMR	Nuclear magnetic resonance. Ydinmagneettinen resonanssi. Menetelmän avulla voidaan esimerkiksi ilmaista puupylvään tiheys.
NTR	Nordiska Träskyddsrådet. Pohjoismaiden puunsuojaneuvosto.
RFID	Radio Frequency IDentification. Radiotaajuinen etätunnistus.

1 Johdanto

Tämä diplomityö käsittelee Suomen sähköjakeluverkossa käytettävien puupylväiden lahoamista. Johdannon ensimmäisessä alaluvussa käsitellään tutkimuksen taustaa. Luvussa annetaan vastaus siihen, miksi puupylväiden lahoamisen tutkiminen juuri nyt on hyvin ajankohtaista.

Kun tutkimuksen taustaa on esitelty, siirrytään johdannossa pohtimaan tutkimusongelmaa. Siinä esitellään tutkimuskysymykset, jotka muodostavat kaikkein tärkeimmän lähtökohdan tälle työlle. Tämän jälkeen edetään alalukuun tutkimuksen tavoite, jossa annetaan tälle työlle selkeät tavoitteet. Johdannon lopuksi rajataan tutkimuksen aluetta ja perustellaan sen ulkopuolelle jätettyjä teemoja. Edellä mainituissa alaluvuissa viitataan myös tämän diplomityön rakenteeseen.

1.1 Tutkimuksen tausta

Suomen sähköjakeluverkkojen uusiminen ja kehittäminen on juuri nyt hyvin ajankohtaista. Sähköjakeluverkkoliiketoiminnan lisääntynyt valvonta sekä sähköntoimituksen laatu- sekä varmuusvaatimukset ovat lisänneet sähköverkkoyhtiöille velvollisuuden kehittää toimintojaan. Tämä näkyy etenkin keskeytyskustannusten hallinnassa. Ne syntyvät pääasiassa maan päällä sijaitsevan puupylväiden varaan rakennetun keskijänniteverkon vioissa, jolloin sähköjakelu asiakkaalle keskeytyy. Vika voi syntyä esimerkiksi kun sähköpylväs on lahonnut niin pahasti, ettei sen lujuus pysty enää kannattelemaan sähköjohtoja, vaan pylväs katkeaa. Tämä aiheuttaa myös hengenvaaran asentajille, jotka tekevät huolto- tai korjaustöitä lahonneissa pylväissä.

Suomessa pylväät lahoavat hitaasti. Niiden keskimääräinen käyttöikä on noin 40–50 vuotta ja niitä on sähköverkkoyhtiöiden käytössä noin 5 miljoonaa. Kun otetaan huomioon se, että Suomen sähköjakeluverkot rakennettiin lähes valmiiksi 1960- ja 1970-luvuilla, on uusimisen tarve valtava.

Pylväiden uusimista ja kunnonvalvontaa vaikeuttaa suuren määrän lisäksi se, että ne lahoavat hyvin yksilöllisesti. Lahoamiseen vaikuttavat hyvin monet tekijät, kuten ympäristö, ilmasto ja puun yksilölliset ominaisuudet.

Pylväiden lahoamista tarkkaillaan lahoisuustarkastuksilla. Kuitenkaan kaikkia pylväitä ei ole kustannussyistä mahdollista tarkastaa. Tarkastukset täytyy ajoittaa mahdollisimman optimaalisesti niin, että pylvään käyttöikä saataisiin kokonaan käytettyä ilman että pylväs katkeaa. Tarkastus voidaan ajoittaa paremmin, ja käyttöiän ennusteesta saadaan tarkempi, kun tunnetaan ympäristön vaikutus pylvään lahoamiseen. Edellä mainitut asiat ja vähäinen aikaisempi akateeminen tutkimus luovat pohjan tälle diplomityölle.

Akateemista tutkimusta ei juurikaan ole tehty samankaltaisesta aineistosta ja muutenkin verrattain vähän ajankohtaisuuteen nähden. Syinä saattaa olla sähköjakeluverkkoliiketoiminnan eroavaisuudet eri maissa, sekä itse pylvään rappeutumiseen liittyvät voimakkaat erot alueittain.

Tässä työssä pyritään lahoisuustarkastustietojen pohjalta etsimään eroavaisuuksia lahoamisnopeuden suhteen ympäristötekijöistä. Tutkimus aloitetaan paneutumalla luvussa 2 puuaineksen tuhoutumiseen ja esitellään Suomessa esiintyviä lahottajasieniä, jotka voivat aiheuttaa puun lahoamista. Alaluvussa 2.3 kerrotaan lahottajien kasvutekijöistä.

Kolmannessa luvussa taas keskitytään itse puupylväiden tuhoutumiseen. Tarkastellaan millaisin keinoin lahoamista yritetään torjua. Paras keino siihen on kyllästeiden käyttö, johon paneudutaan alaluvussa 3.4. Kyllästeet hidastavat lahoamista ja estävät joidenkin lahottajasienten etenemisen kokonaan. Alaluvussa 3.5 taas kerrotaan millainen prosessi puupylvään lahoaminen oikein on.

Tämän alaluvun alussa mainittuun lahoisuustarkastukseen paneudutaan luvussa 4. Siinä esitellään lahoisuustarkastuksessa huomioon otettavia tekijöitä ja itse prosessin eteneminen alusta loppuun. Lahoisuustarkastuksessa käytetään edelleen hyvin perinteisiä työkaluja, joita esitellään alaluvussa 4.2. Koska perinteisten menetelmien käyttö on hyvin virheeltistä ja aikaa vievää, luodaan katsaus kehittyneempiin menetelmiin alaluvussa 4.3.

Lahoisuustarkastusaineisto on saatu Loiste Sähköverkko Oy:ltä. Aineisto koostuu noin 9000 puupylvästä, joista suurin osa on istutettu 1970-luvulla. Pylväitä tarkastettaessa on kirjattu ylös monia tietoja. Niistä tärkeimmät tämän tutkimuksen kannalta ovat alkuperäinen istutusvuosi, halkaisija, nykyinen halkaisija, maaperä ja perustus sekä paikkakunta.

Aineisto kuvataan tarkasti luvussa 5 ja luodaan katsaus aiempaan sähkönjakeluverkon puupylväiden rappeutumista tutkivaan akateemiseen tutkimukseen. Seuraavassa alaluvussa esitellään tämän diplomityön tutkimusta yleisesti sekä siihen liittyviä kysymyksiä.

1.2 Tutkimusongelmat

Tutkimuksen lähtökohtana on selvittää ensiksi, mitkä tekijät vaikuttavat aineiston perusteella lahoamisnopeuteen, ja kuinka paljon ne eroavat toisistaan. Toiseksi, voidaanko yksittäisen keskimääräisen pylvään rappeutumiskäyrä mallintaa annetun aineiston avulla? Toisin sanoen, miten puupylvään lahoaminen etenee sen vanhetessa?

Tutkimuskysymyksiin esitellään vastaukset luvussa 6 ja kerrotaan kuinka tuloksiin on päädytty. Tuloksina esitellään muun muassa suhteelliset lahoamisnopeudet ja niiden keskihajonnat.

Tutkimusta vaikeuttaa se, että aineisto koostuu pääasiassa 1970-luvulla istutetuista pylväistä. Otos kuvaa siis suurimmalta osin vain 1970-luvun puupylväitä. Tämä vaikeuttaa otoksen vertaamista koko pylväspopulaatioon. Lisäksi täytyy muistaa että osa 1970-luvulla istutetuista pylväistä on jo vaihdettu lahoamisen tai muun rappeutumisen seurauksena. Lisäksi joidenkin perustustapojen otokset tietyille maaperälle ovat hyvin pieniä.

1.3 Tutkimuksen tavoite

Edellä esitellyssä alaluvussa kuvattiin lyhyesti tutkimusongelmat. Niistä seuraa päätavoite joka on se, että pyritään selvittämään puupylväiden lahoamiseen vaikuttavat ympäristötekijät ja niiden erot suhteessa toisiinsa annetun aineiston perusteella. Ympäristötekijöiksi on valittu lahoisuustarkastuksessa paikan päällä havaitut maaperä, perustustapa ja paikkakunta. Tarkoituksena on siis löytää lahoamisnopeuteen vaikuttavat ympäristön riskitekijät, jolloin resurssit voidaan paremmin suunnata ensimmäiseksi kriittisimmillä alueilla sijaitseville puupylväille.

Osatavoitteena on muodostaa rappeutumiskäyrät pylväille maaperän ja perustustietojen mukaisesti. Tämä tarkoittaa sitä, että piirretään käyrät lahon määrä iän funktiona aina 0 millimetristä 40 millimetriin. Kyseinen lahomäärä on valittu siksi, että verkostosuosituksen mukaan lahon saavuttaessa 40 millimetriä pylvään halkaisijasta, täytyisi pylväs viimeistään korvata uudella. Toinen osatavoite on tutkia paikkakuntakohtaisia eroja sekä pyrkiä selvittämään mistä paikkakuntakohtaiset erot johtuvat. Viimeinen osatavoite on se, että pyritään löytämään maaperien keskimääräiset rappeutumiskäyrät kun yritetään ottaa huomioon jo poistetut pylväät. Kaikki edellä mainittujen tavoitteiden tulokset esitellään luvussa 6.

Koska aineisto on vain yksi otos koko pylväspopulaatiosta ja vielä suurimmalta osin 1970-luvulla istutettuja pylväitä, täytyy tulosten luotettavuus testata. Testi tehdään Kruskal-Wallis menetelmällä SPSS-ohjelmistolla ja sen tulokset esitellään alaluvussa 6.4. Luvussa pohditaan sitä, kuinka luotettava tutkimus on ja voiko sitä käyttää yleisesti koko pylväspopulaatiolle.

Luvussa 7 Johtopäätökset puolestaan pohditaan aiheen taustan, tulosten ja luotettavuusanalyysin pohjalta tutkimuksen merkityksellisyyttä ja arvioidaan tutkimuksen onnistumista. Tutkimuksen tuloksia verrataan myös aikaisempaan tutkimukseen, jos sellaista on tehty.

1.4 Tutkimuksen rajaukset

Aineistossa on paljon pylväisiin liittyvää tietoa. Kaikkea tietoa ei käytetä hyväksi vaan se rajataan tutkimuksen ulkopuolelle. Tällaisia tietoja ovat esimerkiksi orsitiedot ja tikan aiheuttamat mekaaniset tuhot. Pylväisiin liitetyt orret yms. vaikuttavat eniten mekaaniseen lujuteen, joten ne on jätetty tutkimuksen ulkopuolelle. Tikkojen aiheuttamat tuhot olivat aineistossa niin harvinaisia, ettei niitä otettu osaksi tutkimusta. Tutkimus on siis rajattu koskemaan vain pylväiden juurien (tyvien) lahoamista.

Tutkimuksessa käytetään seuraavia aineiston tietoja: paikkakunta, maaperä, perustus, istutusvuosi, alkuperäinen halkaisija ja nykyinen halkaisija. Lisäksi tutkimukseen otetaan vain CCA-kyllästeiset pylväät, joita aineistossa on suurin osa. Aineisto esitellään, ja sen muokkaamisesta sekä rajaamisesta kerrotaan luvussa 5. Tutkimus pyritään siis pitämään mahdollisimman yksinkertaisena ja keskitytään vain eniten pylvään juuren lahoamiseen vaikuttaviin ympäristötekijöihin.

2 Puuaineksen tuhoutuminen

Puuta voidaan hajottaa sekä mekaanisesti että entsymaattisesti. Puuta hajottavia organismeja ovat hyönteiset: esimerkiksi termit, kuoriaiset, muurahaiset ja pistiäiset. Ne tuhoavat puuta mekaanisesti. Sienet, erityisesti lahottajasienet, hajottavat puuta entsymaattisesti. Myös bakteerit hajottavat puuta. Niiden vaikutus puun hajoamiseen on hitaampi kuin lahottajasienillä.

Tässä diplomityössä pääpaino on lahottajasienten aiheuttamissa vaurioissa, jotka ovatkin pääasiallinen syy puupylväiden tuhoutumiseen Pohjoismaissa. Kuitenkin myös hyönteisiä ja bakteereja tarkastellaan, sillä myös ne saattavat nopeuttaa puupylväiden lahoamista. Ne voivat raivata tietä lahottajasienille puun sisäosiin jolloin lahoaminen nopeutuu. Lisäksi on hyvä tunnistaa niiden aiheuttamat vauriot ja erottaa ne lahoamisesta.

Lahottajasienten aiheuttamaa vauriota kutsutaan yleisesti lahoksi. Tässä luvussa esitellään puulle edellä mainitut vahingollisimmat organismit ja niiden toiminta. Hyönteisiä ja bakteereja käsitellään yleisesti. Lahottajasienet esitellään tarkemmin sillä ne ovat puupylväiden merkittävin tuhoaja.

2.1 Hyönteiset ja bakteerit

Hyönteiset tuhoavat puuta syömällä. Näitä tuholaisia ovat muun muassa muurahaiset, kuoriaiset, termit ja pistiäiset. Ne viihtyvät erityisesti kuivassa puussa, mutta jotkut lajit elävät vain puun lahoutuneissa osissa. Suomen kylmä ilmasto kuitenkin ehkäisee hyönteisten menestymisistä puissa, joten niiden aiheuttamat vahingot ovat pienemmät kuin lahottajasienten, etenkin puutavarassa.

Bakteerit ilmestyvät puuhun pääasiassa vasta kaadon jälkeen. Bakteerit pystyvät hajottamaan puussa olevia yleisiä aineita, kuten selluloosaa. Hajotusprosessi on kuitenkin hyvin hidas esimerkiksi verrattuna lahottajasieniin, joten puun lujuuden ja tuhoutumisen kannalta bakteereilla ei ole paljoa vaikutusta.

Bakteerit pääasiassa estävät sienten toimintaa puussa, mutta esimerkiksi voivat taas edistää katkolahon syntyä ja etenemistä. Lisäksi ne pystyvät sietämään sekä jopa tuhoamaan kyllästysaineita. Tämä edistää lahottajasienten toimintaa erityisesti kyllästetyissä puumateriaaleissa. [1] Kyllästysaineista kerrotaan enemmän alaluvussa 3.4.

Hyönteiset voivat vauhdittaa lahon etenemistä. Ne voivat tehdä lahottajasienille otollisia reittejä puun sisäosiin. Hyönteiset voivat myös jopa heikentää puun lujuusominaisuuksia, jos niiden kaivamat tunnelit ovat tarpeeksi suuria tai niitä on lukuisia. [2]

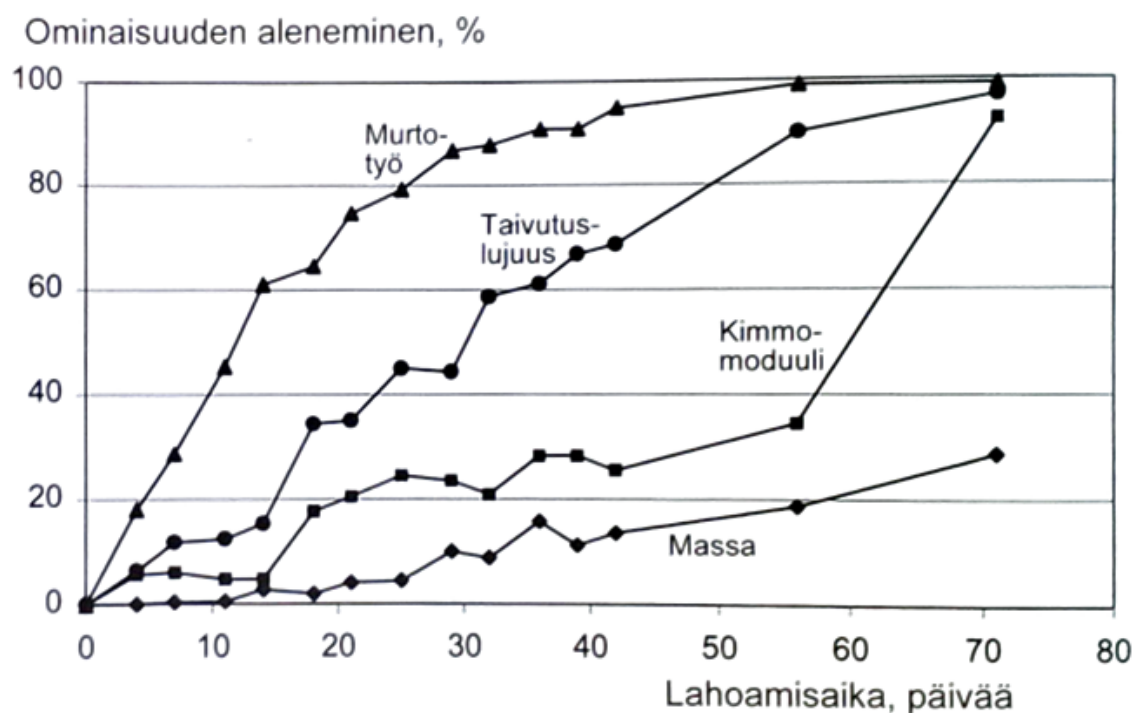
2.2 Lahottajasienet

Lahottajasienet ovat nimensä mukaisesti lahottavia sieniä, jotka muuttavat puuta lahoksi kemiallisesti tai fysikaalisesti. Lahottajasienet erittävät puuta hajottavia entsyymejä, jotka pystyvät tuhoamaan puun soluseinän komponentteja. [3] Puuaineksen tuhoutuminen on yleensä tässä

tapauksessa selluloosaa, hemiselluloosaa tai ligniiniä. Niitä esiintyy pääasiassa soluseinien rakenteissa. [2]

Puut koostuvat pääasiassa soluista. Niiden muodostamat soluseinämät ja puun solukko luovat puulle lujuusominaisuudet. Lahoamisen seurauksena ne tuhoutuvat, jolloin puun lujuus heikkenee. Lisäksi puun tiheys laskee. Lahottajasienet ovatkin yleisimpiä ja ongelmallisimpia tuhoajia puun käytössä, ja ne voivat lyhentää puun elinikää hyvinkin nopeasti niille suotuisissa olosuhteissa. [2] Olosuhteista kerrotaan tarkemmin alaluvussa 2.3.

Kuvassa 1 esitetään puun ominaisuuksien aleneminen kun lahoaminen etenee. Murtotyö sekä taivutuslujuus laskevat hyvin nopeasti kun taas massan pieneneminen on hitaampaa. Testi on tehty laboratorio-olosuhteissa ja testikappaleena on käytetty pientä puupalaa. Testissä lahottajasieni on altistettu sille optimaaliseen elinympäristöön, joten lahoaminen on hyvin nopeaa. Siksi lahoamista ja siitä seuraavia puun ominaisuuksien alenemisiä ei voida ajallisesti suoraan verrata luonnossa sijaitsevan puun lahoamiseen.



Kuva 1: Puun ominaisuuksien aleneminen lahon edetessä.¹ [2, 4]

Lahokestävyys vaihtelee sekä puulajeittain että puun yksilöllisten ominaisuuksien mukaan. Etenkin yksittäisen puun perintötekijät vaikuttavat lahokestävyyteen. Suomessa käytetään männystä valmistettuja puupylväitä, koska niiden luontainen lahonkestävyys on parempi kuin lehtipuilla. Lahonkestävintä on sen sydänpuun uloin osa. [5] Myös puussa olevien uuteaineiden on todettu torjuvan puun tuholaisia ja näin osittain lahoa. Monet puulajit ovatkin luonnollisesti pitkäikäisiä johtuen uuteaineesta, joka on

¹ Curling S. et al. testasivat ilmakeiwaterun männyn pintapuun ominaisuuksien lujuus- ja kestävyysominaisuuksien muuttumista, kun pieni pala sen pintapuuta altistettiin ruskolaholle optimaalisissa olosuhteissa. Testi kesti kymmenen viikkoa. [4]

myrkyllistä lahottajasienille ja hyönteisille. Monet lajit ovat myös tunnettuja lahonkestokyvystä, kuten tammi ja tiikki. [6]

2.2.1 Lahottajasienten luokittelu

Lahottajasienten luokittelu on vaikeaa, sillä niitä on suuri määrä. Ne voidaan kuitenkin luokitella joko päätyyppien tai esiintymisen mukaan. Päätyypit ovat rusko-, valko- ja katkolahottajat sekä sinertymäsienet. Esiintymisen mukaan ne voidaan jaotella metsälahottajiin, varastolahottajiin ja puurakenteiden lahottajiin. [7] Tässä diplomityössä lahottajasienet on jaoteltu päätyyppien mukaisesti, koska sitä luokittelua on käytetty yleisesti puupylväiden lahoamiseen liittyvässä kirjallisuudessa.

Hajottamisnopeus riippuu paljolti lahottajasienityypistä [3]. Myös erityyppiset lahottajasienet suosivat eri puulajeja. Mäntypuille ja siten myös puupylväille suurimmat tuhot aiheuttavat ruskolahottajat sekä katkolahottajat. [3, 8]

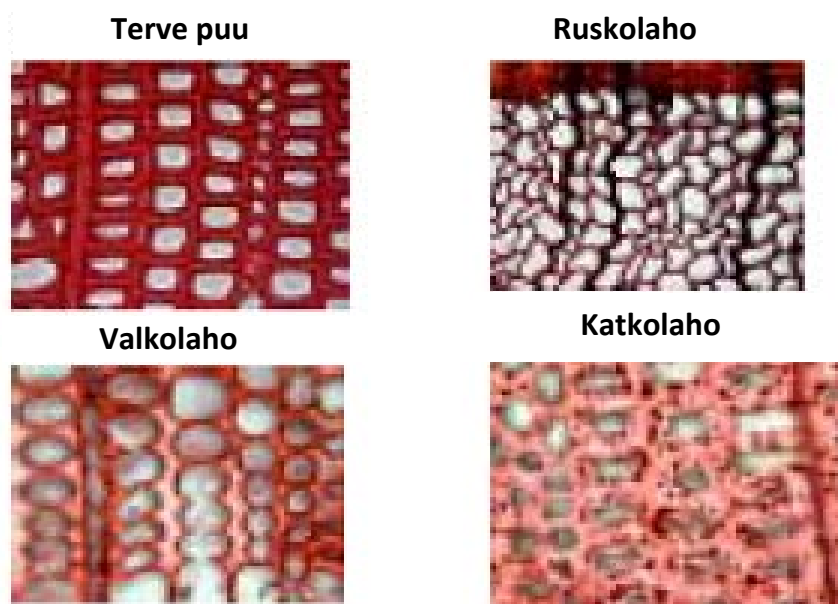
Lahottajasienet voivat levitä elävään puuhun monella eri tavalla, kuten maaperän kautta, kuoren tai vahingoittuneen kohdan kautta tai hyönteisten aiheuttamien tuhojen seurauksena jne. Kun sieni pääsee kosketuksiin puun kanssa, se erittää rihmojensa päistä entsyymejä, jotka tunkeutuvat soluseiniin hajottaen niitä. [7]

Ruskolahottaja (engl. brown rot) kuuluu kantasieniin eli Basidiomycetes-sukuun. Se hajottaa pääasiassa puun polysakkarideja: selluloosaa ja hemiselluloosaa. Se voi myös harvoin hajottaa ja tehdä muutoksia ligniiniin [9]. Ruskolahottajan seurauksena puu muuttuu ruskeaksi ja hauraaksi. Sen lujuus heikkenee sekä lahonnut osa murenee kuivana. Ulkoisesta olemuksesta johtuen tätä lahotyyppiä kutsutaankin usein myös korroosiolahoksi [2]. Ruskolahottaja on pääosin havupuiden lahottajasieni, mutta jotkin ruskolahottajat ovat erikoistuneet myös lehtipuiden lahottamiseen. [3]

Katkolahottajasienet (engl. soft rot) kuuluvat kotelosieniin eli Ascomycetes- tai fungi imperfekti -sukuun. Sen entsyymit pystyvät hajottamaan kaikkia soluseinän komponentteja: ligniiniä ja hemiselluloosaa [10]. Katkolahottajaa esiintyy sekä havu- että lehtipuissa. Sienen toiminnan seurauksena puun lujuus heikkenee, mutta se säilyttää kovuutensa ja muotonsa varsin pitkään [3]. Puuaines katkeaa kuitenkin helposti, jos ulkopuolinen voima kohdistuu kohtisuoraan syitä vasten. Lahoaminen voi alkaa puun sisältä, joten alkuvaiheessa lahoa ei aina pystytä tunnistamaan pelkällä näköhavainnolla. [8]

Valkolahottaja (engl. white-rot) tuhoaa pääasiassa ligniiniä, mutta se voi myös hajottaa polysakkarideja [10]. Puuaines muuttuu vaaleaksi ja pehmeäksi entsyymaattisen toiminnan seurauksena. Tällöin myös puun lujuus heikkenee [7]. Valkolahottajasieniä esiintyy pääasiassa lehtipuissa [7] eikä näin ollen ole haitaksi havupuista tehdyissä puupylväissä.

Kuvassa 2 esitetään puun terveen solukon tuhoutuminen eri lahottajasienillä. Kuten kuvasta nähdään, on solukkojen tuhoutuminen hyvin erilaista eri lahottajilla. Esimerkiksi katkolahottajan kuvassa näkyy hyvin, kuinka se pystyy tuhoamaan soluseinämän kaikkia komponentteja verrattuna valko- ja ruskolahoon.



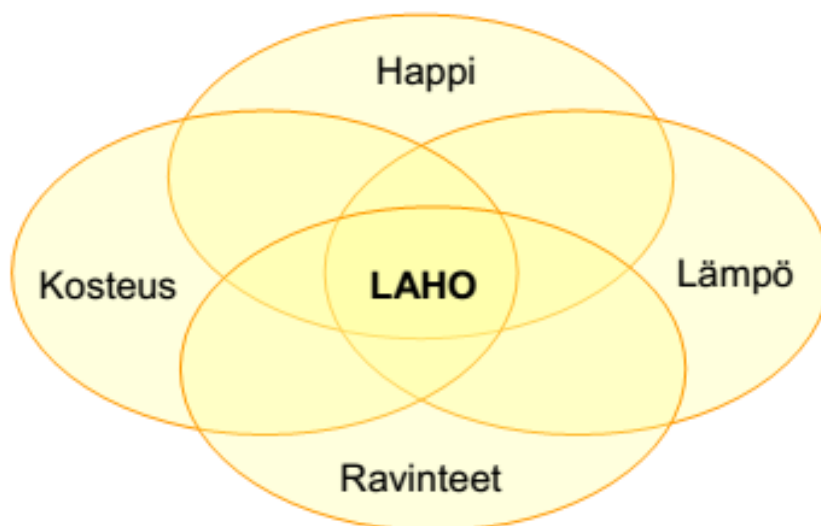
Kuva 2: Terveen puun soluseinämien tuhoutuminen lahottajasienten hyökätessä. [11, 12]

Sinistymäsieni (engl. blue-stain fungi) esiintyy pääosin havupuissa. Se voi hajottaa polysakkarideja rajoitetusti [3]. Tyypillisin tämän sienityypin aiheuttama vaurio on sininen tai musta värjäytymä. Se ei tuhoa soluseinämiä kuten edellä mainitut lahottajasienet joten sen vaikutus puun mekaanisen lujuuden vähenemiseen on vähäinen. Puun tuhoutuminen on siis lähinnä esteettistä. [2]

2.3 Lahottajasienten kasvutekijät

Lahottajasienet ovat mädänsyöjiä eli ne saavat ravintoa kuolleesta orgaanisesta aineesta. Ne tarvitsevat selviytymiseensä riittävästi ravintoa, tarpeeksi kosteutta, sopivaa lämpötilaa sekä happea. Riittävä kosteus on yleensä yli 20 prosenttia (puun kuivapainosta) ja se on ideaalinen lähellä kuidun kyllästyspistettä. Kosteus on näistä kaikista tärkein elementti. Voidaankin todeta että jos puu pidetään kuivana, ei lahoamista tapahdu. Toisaalta veden alla hapen määrä on niin vähäinen, että se käytännössä estää lahon syntymisen.

Lahottajasienet aktivoituvat noin +5 celsiusasteessa (°C) ja parhaiten ne menestyvät +20...+35 °C:ssa. Jos lämpötila on alle sen vaatiman tai happea tai kosteutta ei ole tarpeeksi, lahottajasieni ei kuole vaan jää lepotilaan kunnes ympäristötekijät ovat toiminnan kannalta otolliset. Lahottajasienen toimintaan vaikuttavat myös ympäröivän maaperän tyyppi, valon määrä, pH-taso, puun laatu sekä kyllästysaineet. [10] Kuvassa 3 esitetään lahoamiseen tarvittavat neljä päätekijää.



Kuva 3: Lahottajasienten menestymiseen vaikuttavat tärkeimmät tekijät. [13]

Ideaalinen sijainti lahottajasienille on noin 50 millimetristä (mm) aina 450 millimetriin maaran alapuolella, jossa hapen ja kosteuden yhdistelmä on optimi [14]. Mentäessä syvemmälle maaperään lahottajasieneltä loppuu happi, ja maaran yläpuolella kosteus alenee. On myös esitetty, että sienten kasvu loppuu tavallisesti 1,5 metrin (m) syvyydessä ja tiiviissä maassa 0,5 m:n syvyydessä [8]. Ideaalinen sijainti lahottajasienille riippuu siis paljon maaston ja ilmaston ominaisuuksista, sekä itse lahottajasienen ominaisuuksista. Esimerkiksi katkolahottajat voivat kasvaa vähähappisissakin ja erittäin kosteissa olosuhteissa, joissa muut lahottajat eivät pysty toimimaan [2]. Ruskolahottajat taas vaativat suhteellisen alhaisen kosteuden menestyäkseen, ja katkolahottajat pystyvät toimimaan myös rutikuivissa olosuhteissa [2, 8].

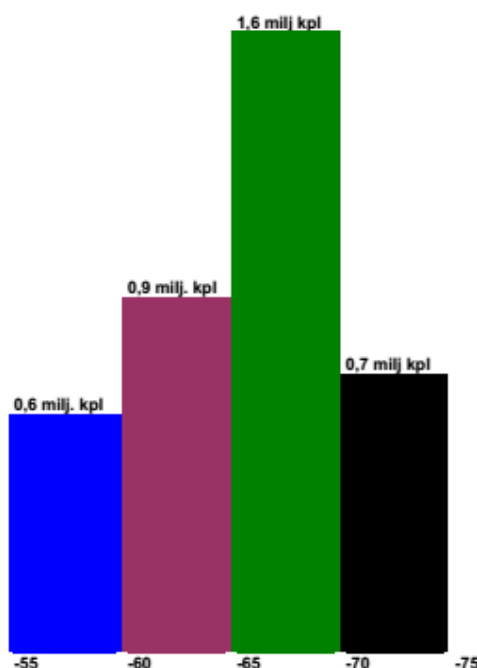
3 Pylvään tuhoutuminen

Tässä luvussa esitellään aluksi Suomen puupylväskantaa yleisesti. Sen jälkeen kerrotaan pylväiden tuhoutumiseen vaikuttavista tekijöistä ja kuinka pylväiden ikääntymistä ja tuhoutumista voidaan estää erilaisin menetelmin.

Suomessa puupylväiden tuhoutumiseen vaikuttavat suurimmalta osin lahottajasienet, mutta myös muurahaiset ja tikat aiheuttavat tuhoutumista. Niiden vaikutukset ovat kuitenkin minimaalisia verrattuna lahon aiheuttamaan tuhoon. Kuten jo luvussa 2 mainittiin, voivat tikkojen ja hyönteisten aiheuttamat mekaaniset tuhot vauhdittaa lahon etenemistä pylväissä. Kuitenkin Suomen olosuhteissa voidaan yleisesti olettaa, että puupylväiden tuhoutuminen riippuu pääasiassa lahottajasienen aktiivisuudesta. Tätä aktiivisuutta voidaan ehkäistä ja hidastaa kyllästysaineilla.

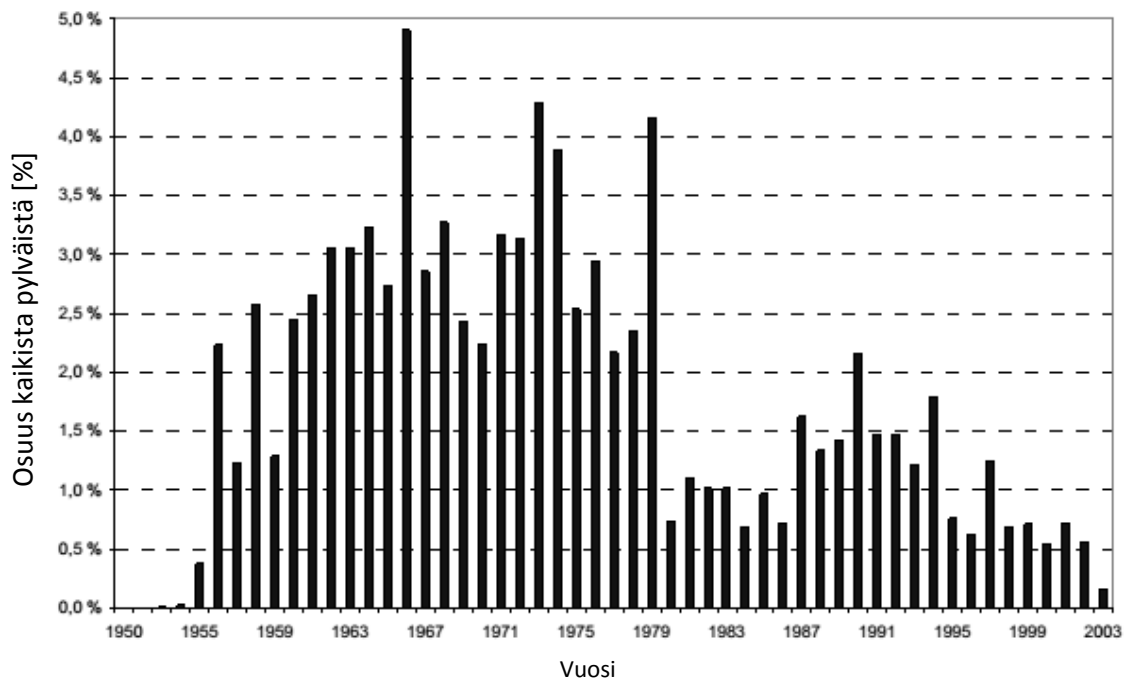
3.1 Puupylväät Suomessa

Suomen keskijänniteverkon pituus oli vuonna 2012 noin 139 000 kilometriä (km). Siitä maakaapelin osuus oli noin 13 %, joten suurimmalta osin sähköjakeluverkko koostuu puupylväissä kulkevista ilmajohdoista. [15] Suomen verkkoyhtiöllä on käytössään noin viisi miljoonaa kyllästettyä puupylvästä. Yleensä niiden käyttöikä on noin 40 - 50 vuotta ja näistä suurin osa on tullut käyttöikänsä loppuun. Tämä johtuu siitä, että Suomen sähköjakeluverkko rakennettiin pääosin valmiiksi 1950-, 1960- ja 1970-luvuilla. Viisikymmentäluvun puupylväät on pääosin jo uusittu, mutta 1960- ja 1970-lukujen pylväistä vielä suurin osa on uusimatta. Suurimmat vaihdot ovat siis vielä edessä seuraavan 10 – 20 vuoden aikana. Kuvassa 3 on kuvattu pylväiden asennusmäärä vuodesta 1955 vuoteen 1975. Niitä on yhteensä 3,8 miljoonaa kappaletta. [16]



Kuva 4: Suomen pylväskannan muodostuminen vuosina 1955–1975. [17]

Pylväiden ikääntyminen on erityisesti maaseudulla toimivien sähköverkkoyhtiöiden ongelma. Kaupungeissa toimivilla yhtiöillä sähköverkot sijaitsevat suurimmalta osin maan alla. Kuvassa 5 on erään suomalaisen pääasiassa kaupunkien ulkopuolella toimivan sähköverkkoyhtiön puupylväiden prosentuaalinen pystytys (istutus) vuosittain. Kuvasta nähdään, että suurimmat rakentamisurakat on tehty 1960- ja 1970-luvuilla.



Kuva 5: Tyypillinen pylväiden istutusjakauma maaseudulla toimivassa sähköverkkoyhtiössä. [18]

Kuten puun rappeutumiseen, niin myös puupylvään rappeutumiseen vaikuttavat monet eri tekijät. Tästä syystä saman ikäisten yksittäisten pylväiden kunnot voivat vaihdella suurestikin, joten niiden kunto joudutaan tarkistamaan yksittäin lahoisuustarkastuksilla. Tämä tarkoittaa suurta työmäärää ja tarkastuksen oikea-aikaista ajoittamista. On kustannusten hallinnan kannalta tärkeää ajoittaa pylväiden uusiminen oikeaan aikaan, koska usein myös sähkölinjat uusitaan samalla puupylväiden kanssa. Sähkölinjojen tekninen pitoaika heijastelee siis puupylväiden pitoaikaa. Uusi sähkömarkkinalaki (588/2013) kiristää laatu- ja toimitusvarmuutta, joten puupylväiden tuhoutumisesta johtuvat kustannukset ovat nousseet. Lisäksi tuhoutuva puupylväs aiheuttaa asentajalle vaaran ja voi kaatuessaan aiheuttaa hänelle huomattaviakin vahinkoja. [19]

Toimitusvarmuutta ja sähkön laatua pyritään nykyisin lisäämään maakaapeloinnilla. Suomen maakaapelointiaste on tällä hetkellä noin 29 prosenttia ja sen odotetaan nousevan 44 prosenttiin vuoden 2019 loppuun mennessä [20]. Maakaapelointi ei kuitenkaan tule kokonaan syrjäyttämään ilmajohtoja, sillä etenkin maaseudulla ja muilla harvaanasutuilla alueilla kustannusten kannalta ilmajohtojen vetäminen on paljon edullisempaa kuin maakaapelointi.

3.2 Puupylvään tuhoutumiseen vaikuttavat tekijät

Suomessa lahoaminen on yleisin puupylvään tuhoutumiseen vaikuttava tekijä. Sitä pyritään ehkäisemään pylvään kyllästämällä. Lahottajasienten menestymiseen vaikuttaa alaluvussa 1.3 mainittujen tekijöiden lisäksi myös suuresti puupylvään kyllästyksen laatu.

Pylväs sopeutuu ympäröivään kosteuspitoisuuteen riippuen siitä, millaiset ympäröivät olot ovat maassa ja ilmassa. Kuvassa 6 esitetään pylvään lahottajasienten aktiivisuuteen vaikuttavia tekijöitä. Kuten kuvassa nähdään, lahoamiseen vaikuttaa hyvin moni eri tekijä.



Kuva 6: Puupylvään lahoamiseen vaikuttavat tekijät. [21] (mukaillen)

Pylväissä kiinni olevat laitteet voivat lisätä veden ja hapen määrää pylvään ympäristössä. Niitä pitkin voi esimerkiksi valua sadevettä pylvään maanalaiseen tyviosaan, jolloin lahottajasienillä on paremmat olosuhteet menestymiseen. [17] Tikan kolot, salaman iskujen aiheuttamat halkeamat, sekä ajoneuvojen ja työkoneiden huolimaton käyttö voivat aiheuttaa mekaanisen lujuuden heikkenemistä. Näiden vaikutukset ovat kuitenkin hyvin pieniä pylväiden käyttöikien lyhenemiseen verrattuna lahon aiheuttamaan maarajan tuhoon.

Kuten aikaisemmin todettiin, lahoaminen vaikuttaa negatiivisesti puun mekaaniseen kestävyYTEEN. Toinen mekaaniseen kestävyYTEEN vaikuttava tekijä on kuormituksen

muutos, esimerkiksi kova tuuli tai lumikuormat. Jos pylväs on jo valmiiksi lahonnut, saattaa kuormituksen muutos katkaista pylvään. Tässä diplomityössä pääpaino on puupylvään lahoamisessa, joten muita kuormitustekijöitä lähinnä sivutaan.

3.3 Lahoamiseen vaikuttavat maaperät ja sijainnit

Maaperän koostumus vaikuttaa suuresti lahon etenemisnopeuteen puupylväissä. Erityisesti pellot ja niityt nopeuttavat lahon etenemistä pylväässä [8], sillä niissä on yleensä lahoamista kiihdyttävää typpeä, sekä maa on kuohkeaa [17]. Kuohkea maaperä auttaa lahottajasieniä, koska elintärkeä happi pääsee paremmin maaperään. Kiilakiveyksen umpeutuminen ja viljelymaan lannoitus lisäävät myös lahottajasienten aktiivisuutta. Lisäksi on huomattu, että pylväiden eteläpuolen osat lahoavat nopeammin pelloilla ja niityillä. [8]

Metsissä lahoaminen ei ole niin nopeaa kuin edellä kerrotuissa sijainneissa, mutta on huomattu että tienvarsien reunoille pystytettyjen puupylväiden tien puoleiset osat lahoavat nopeammin kuin niiden toiset puolet. [8] Hiekkamaassa lahoaminen on nopeampaa kuin savimaalla ja suomaastossa. Lisäksi yleensä veden alla oleva pylväsosa lahoaa hyvin hitaasti [8], koska happea ei ole saatavilla. Siksi suomaastossa pylväs lahoaaakin pääasiassa maarajan yläpuolelta. Myös kalliolla lahoaminen on hidasta. Sen sijaan pylvään ollessa kosketuksissa asfaltin tai betonin kanssa lahonopeus kasvaa [22].

3.4 Kyllästeet

Tässä luvussa esitellään Suomessa yleisesti puupylväiden lahontorjuntaan käytettäviä kyllästysaineita. Suomessa yleisin puupylväisiin käytetty kylläste on CCA-kylläste (Chromated copper arsenate) eli kupari-, kromi- ja arseenipohjainen suolakylläste.

Suomen pylväskannasta noin 90 % on suolakyllästeisiä [17]. Suomi kielsi Euroopan unionin säädökseen vedoten CCA-kyllästeiden käytön 1.9.2006. Kielto perustui arseenin terveys- ja ympäristöhaittoihin. Sen jälkeen on käytetty lähinnä kreosootti- ja C-kyllästeisiä eli kupari-kyllästeisiä yhdisteit. Kreosootti kuitenkin tultaneen kieltämään lähivuosina sen haittavaikutuksien vuoksi.

Suomessa voidaan tavata vielä joitakin Celcure-tyyppisellä suolalla kyllästettyjä pylväitä. Sen sijaan ennen vuotta 1953 käytössä olleita Wolman- ja Boliden BIS – suoloilla kyllästettyjä pylväitä ei juuri enää tavata.

3.4.1 Suolakyllästeet

Intialainen tutkija Sonti Kamesam keksi CCA-kyllästeen vuonna 1933 ja Suomessa se on ollut kyllästeenä teollisessa käytössä vuodesta 1952. CCA-kyllästeet luokitellaan eri tyypeihin niiden sisältämän arseenimäärän mukaan. Tyyppejä ovat A-, B- ja C-tyypit. Suomessa on käytetty sen kahta eri koostumusta: B-tyyppiä aina vuoteen 1982 asti, jolloin C-tyyppi otettiin käyttöön. C-tyyppi eroaa B-tyypistä siinä, että C-tyypissä on arseenia vähemmän ja kromia enemmän, jolloin kylläste pysyy paremmin pylväässä [23]. Näin myös ympäristön turvallisuus parantui [17]. Lisäksi puupylväistä liukeneminen on pienempää kuin esimerkiksi sahatavarasta [24].

C-tyyppi sisältää 16–38 % kromitrioksidia, 10–25 % diarseenipentoksidia ja 6–14 % kuparioksidia tuotteesta riippuen. Vesipohjaisessa CCA-kyllästeessä käytetään pääasiassa kupariarsenaattia ja kuparidikromaattia. Sen väkevyys on 2–2,5 %. [25]

Kupariyhdisteet torjuvat lahoa ja kromi estää kuparin liukenemisen pois puusta. Vesiliukoinen kylläste puristetaan puun solukkoon, jolloin kylläste muuttuu liukenemattomaksi. Tällöin se kiinnittyy puuhun lisäten suojaustehoa vuosikymmeniksi, eikä kyllästettä valu paljoa ympäristöön pitkänkään ajan kuluttua. [17]

CCA-kyllästetyt puupylväät ovat erittäin myrkyllistä vesieliöille, ja myrkyllisyys kasvaa happamuuden lisääntyessä. Arsenipentoksidi on ihmiselle myrkyllistä sekä nieltynä että hengitettynä, ja se voi aiheuttaa syöpää. Kromi puolestaan kuusiarvoisena voi aiheuttaa häiriötä hedelmällisyyteen ja sikiön kehitykseen. Kyllästetyssä puussa kromi muuttuu kuusiarvoisesta kolmiarvoiseksi, jolloin haittavaikutukset ovat vähäisemmät. Sen on kuitenkin todettu olevan haitallista hengitykselle ja se ärsyttää ihoa. [26]

Arseenikyllästetyt puupylväät ovat käyttöiän jälkeen ongelmajätettä, joten ne tulee kemikaalilain mukaan (744/1989 25 §) luovuttaa vain valtuutetuille toimijoille. Pylväitä voidaan kuitenkin luovuttaa tietyin edellytyksin ammattimaiseen tai teollisuuskäyttöön, jolloin puu on merkittävä asetuksen mukaisin varoitusmerkinnöin (komission asetus (EY) N:o 552/2009).

3.4.2 Kreosoottikylläste

Kreosoottikyllästeisiä pylväitä on noin 10 % Suomen pylväskannasta. Kreosoottiöljyä on käytetty noin 150 vuotta lahonestoaineena. Sitä alettiin valmistaa Englannissa laivojen ja muiden laholle alttiiden puurakenteiden suojaamiseksi. Suomeen kreosoottiöljy tuli lahontorjunta-aineeksi 1900-luvun alussa. [16]

Kreosoottia valmistetaan tislaamalla kivihiilitervaa 200 °C:ssa, ja tehoaineina käytetään tervahappoja. Niiden määrä vaikuttaa olennaisesti lahonkestävyyteen. Öljy sisältää myös tervaemäksiä ja neutraaliaineita, ja yhteensä yli 200 yhdistettä. [17]

Toisin kuin CCA-kyllästeessä, kreosootti ei kiinnity puuhun kiinnittymisreaktion avulla. Tästä seuraa se, että jos kyllästettä on puussa liikaa, se voi valua puusta pois useankin vuoden ajan. Kreosoottia haihtuu puusta myös auringonpaisteen ja lämmön seurauksena [27]. Se kuitenkin antaa hyvin pitkäikäisen suojan puupylväälle, jopa paremman kuin CCA-pylväs. Kreosoottiöljy valuu ajan kuluessa uusissa pylväissä alaspäin lisäten lahonkestävyyttä maarajassa. Pylvään yläosassa suojaus taas heikkenee. [17]

Kreosoottia saa käyttää kyllästämiseen Suomessa ainakin vuoteen 2015 asti ja EU on hyväksynyt sen kyllästeenä ainakin vuoteen 2018 asti [28]. Kreosootti hyväksytään aina viideksi vuodeksi kerrallaan, joten sen tulevaisuus kyllästeaineena on epävarma. Se onkin myrkyllisyytensä vuoksi luokiteltu aineeksi, jolle pitää etsiä korvaajaa. [29] Käytöstä poistettu kreosoottikyllästetyn puun on luokiteltu vaaralliseksi jätteeksi, joten se on toimitettava asianmukaisille toimijoille hävitettäväksi.

Kreosoottikyllästetyt puut ovat usein ruskeita sekä voimakkaan hajuisia. Uusista pylväistä tihkuu öljyä joka tahraa puun pinnan. Kun pylväs vanhenee, tihkuminen vähenee ja puun pinta on kuivempi. [17]

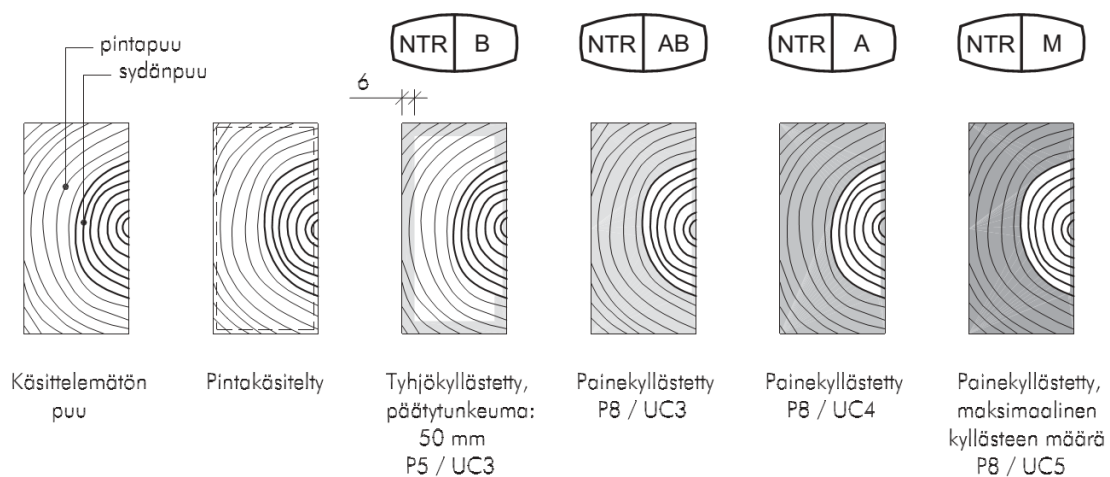
Kreosoottiöljy on erittäin myrkyllistä vesieliöille sekä myrkyllistä ihmisille. Se voi ärsyttää silmiä ja hengitystä, sekä ihokosketuksessa ärsyttää ihoa. Sen todetaan aiheuttavan syöpää, ja se saattaa heikentää hedelmällisyyttä sekä sikiötä. [30]

Työntekijöiden asianmukainen suojautuminen on todettu ongelmalliseksi, kun he työskentelevät kreosoottikyllästeissä puupylväissä. Altistumista kyllästeelle on pelätty suojautumisesta huolimatta. Edellä mainituista syistä monet sähköyhtiöt ovatkin siirtyneet kuparikyllästeisiin pylväisiin, vaikka niiden tekniset pitoajat ovat paljon pienemmät. [11]

3.4.3 Kyllästysluokat ja vaatimukset pylväille

Suomessa standardi SFS 2662 [31] määrittelee ilmajohtoihin käytettävien männystä valmistettavien sähköpylväiden mitta- ja laatuvaatimuksia. Pylväs tulisi valmistaa mieluiten mäntyrungon tyviosasta, joka on luontaisesti oksaton. Pylväsaihiot tulisi kuoria ja sorvata puhtaaksi, sekä kuivata alle 28 prosentin kosteuteen ennen kyllästystä. [31]

Puupylväät painekyllästetään standardin SFS-EN 351 [32] puunsuojausluokan P8 ja standardin SFS-EN 335 [33] käyttöluokan U4 mukaan, sekä Pohjoismaiden puunsuojausneuvoston asiakirjassa 1:1998 esitetyn (NTR Nordiska Träskyddsrådet) luokituksen A mukaisesti [31]. Kuvassa 7 esitetään edellä mainittujen luokkien väliset riippuvuudet. Pylväaseen merkitään NTR:n mukainen merkintä kyllästysluokasta. Pylväiden toimittajalla tulee olla tarvittavat luvat leimaamiseen sekä laadunvalvonta.



Kuva 7: Kyllästysaineen tunkeuma puuhun ja sitä vastaavat standardoidut merkinnät. Sähkönjakeluverkon puupylväissä käytetään yleisesti luokkaa P8/UC4. [34]

Esimerkiksi käyttöluokka U4:ssa, jonka suositeltava kyllästysluokka on A, käyttöalue määritellään seuraavasti: ”Puu, joka on jatkuvassa kosketuksessa maahan tai makeaan veteen tai meriveteen, jonka suolapitoisuus on enintään 0,7 % (kaikki Suomen rannikkovedet), tai on erityiselle säärasitukselle alttiina, ja jonka lujuuden ei henkilöturvallisuussyistä sallita heikentyvän tai jonka vaihtaminen on vaikeaa.” [34]

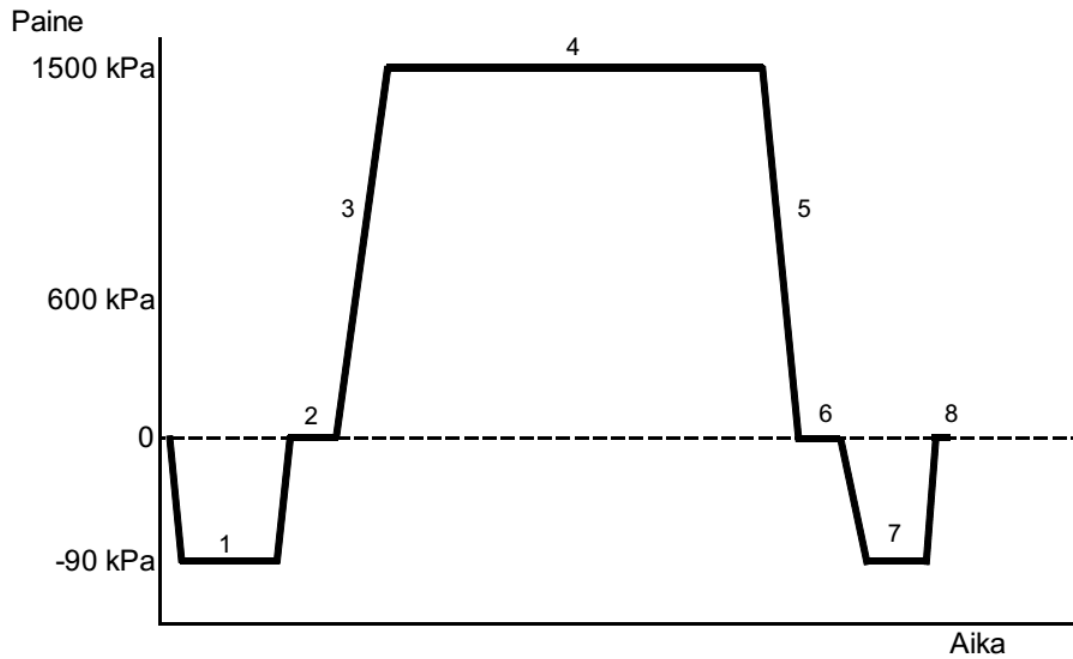
3.4.4 Kyllästysprosessi

Ensimmäinen askel pylvään kyllästysprosessissa on hyvä suunnittelu, jottei kaadettu puu joudu heti märkään tilaan. Pylväspuut kaadetaan talvella jolloin vältetään biologiset vauriot. Kyllästystä ei suoriteta heti kaadon jälkeen vaan puut kuivatetaan puolipuhana. Se tarkoittaa että niiden kuori poistetaan. Kuivatus suoritetaan niin, etteivät puun rengashuokokset tukkeudu. Siten varmistetaan parempi kyllästysaineen tunkeutuminen puun sisään. [19] Kuivatus ja varastointi kestävät yhteensä noin 12–18 kuukautta [17].

Puut sorvataan vasta puiden ollessa kuivia. Tämä tapahtuu ennen kyllästystä, jolloin kyllästysaine tunkeutuu paremmin puuhun. Puun pinta sekä nila- että jälkiosat hidastavat kyllästysaineen tunkeutumista puun sisään. Ennen 1960-lukua pylväitä kyllästettiin paljon myös puolipuhana. Näissä pylväissä esiintyy yleisesti pistemäistä lahoa. [17]

Puupylvään lahonkestävyyteen vaikuttaa pääasiassa ympäristötekijöiden ohella puun esikäsitteilyn ja kyllästyksen laatu. Mitä syvemmälle ja enemmän kyllästettä saadaan puun sisään niin että se myös jää sinne, sitä parempi on lahonkestävyys. Puupylväiden kyllästämiseen käytetään pääasiassa kahta eri menetelmää: suolakyllästeille Bethell-menetelmää ja kreosoottikyllästeille Ruping-menetelmää.

Bethell-prosessi kehitettiin vuonna 1839. Se on täyssolumenetelmä, jota käytetään nykyään esimerkiksi kuparikyllästeiden kanssa. Sen tarkoituksena on saada puun solukko mahdollisimman täyteen kyllästysainetta. Ensimmäisenä puun solukosta imetään ilma alipaineen avulla kyllästyssylinterissä. Tämä kestää yleensä tunnin. Seuraavaksi luodaan ylipaine, joka pakottaa kyllästeen puun sisään. Vaihe kestää noin kahdesta kolmeen tuntiin riippuen halutusta lopputuloksesta. Viimeinen prosessi on lopputyhjö, jolla ylimääräinen kylläste saadaan poistettua puusta. Puun pinta siis kuivatetaan. [10, 17] Kuvassa 8 esitetään Bethell-prosessin eteneminen. Prosessivaiheiden painearvot ovat suuntaa antavat.

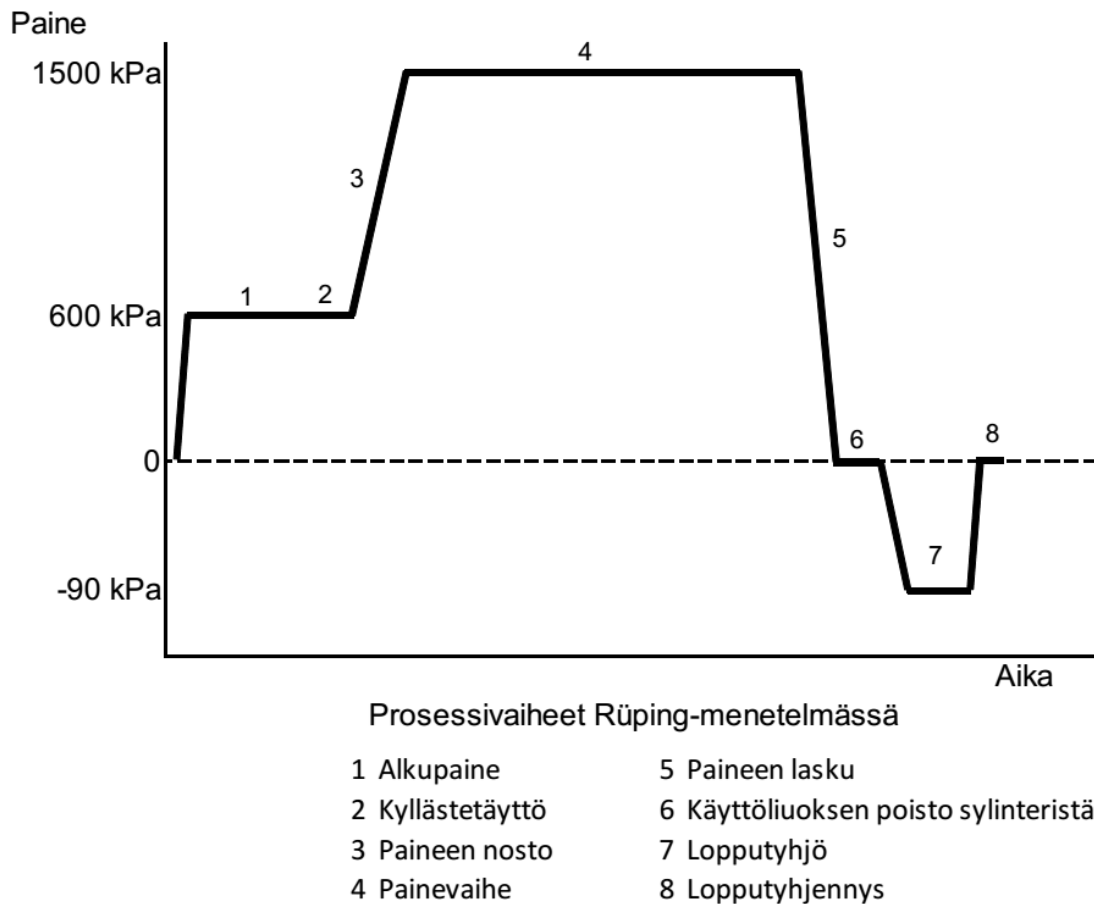


Prosessivaiheet Bethell-menetelmässä

- | | |
|-----------------|--------------------------------------|
| 1 Alkutyhjö | 5 Paineen lasku |
| 2 Kyllästyttö | 6 Käyttöliuoksen poisto sylinteristä |
| 3 Paineen nosto | 7 Lopputyhjö |
| 4 Painevaihe | 8 Lopputyhjennys |

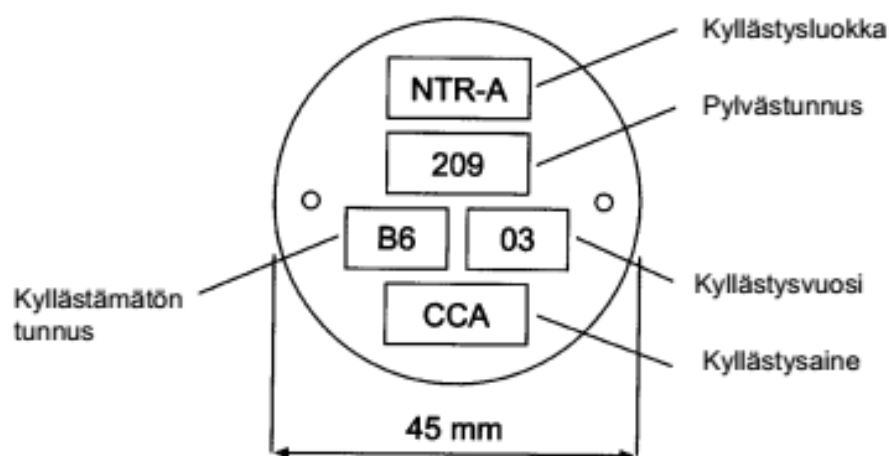
Kuva 8: Bethell-kyllästysprosessin vaiheet. [35, 36]

Ruping-prosessi on tyhjosolumenetelmä. Tässä esimerkiksi kreosootti halutaan saada tunkeutumaan syväälle puuhun solukkoon. Kyllästyssylinteriin luodaan ylipaine joka ilmaa puun solukkoa. Tämän jälkeen painetta lisätään, jolloin kyllästysaine tunkeutuu puun sisään. Lopuksi ylimääräinen kylläste saadaan poistettua Bethell-prosessin tapaan lopputyhjöä käyttäen. [10, 17] Kuvassa 9 esitetään Ruping-prosessin eteneminen. Prosessivaiheiden painearvot ovat suuntaa antavat.



Kuva 9: Rüping-kyllästysprosessin vaiheet. [35, 36]

Puupylväiden valmistusprosessin lopussa niihin kiinnitetään metallilevy, johon on merkitty vaadittavat tiedot pylväästä. Kuvassa 10 on esitetty standardin SFS 2662 mukainen merkintälevy.



Kuva 10: Kyllästettyyn pylvääseen liitettävä, sen tietoja sisältävä metallinen levy. [31]

Levy antaa kuntotarkastajille tärkeää tietoja, jota voidaan käyttää eri tarkoituksiin. Esimerkiksi osa tämän diplomityön aineiston tiedoista on saatu merkintälevyistä.

3.5 Puupylväiden lahoaminen

Luvussa 2 kerrottiin kuinka puuaines lahoaa. Tässä luvussa siirrytään tarkastelemaan kuinka kyllästetty puupylväs lahoaa. Kyllästysaineet eivät anna ikuista suojasta lahottajasienille vastaan. Tähän on monia syitä. Esimerkiksi bakteerit pystyvät hajottamaan tai muuttamaan kreosoottia, pentakloorifenoleita ja CCA-kyllästeitä. Ne siis raivaavat tilaa lahottajasienille poistamalla kyllästeitä. Ruskolahottaja pystyy muuttamaan CCA-kyllästeitä liukoiseen muotoon, ja katkolahottajat voivat toimia painekyllästetyissä puissa. [2] Puupylväät kohtaavat ominaisuuksiensa mukaan sisälahoa, pintalahoa tai latvalahoa.

Sisälahoa tavataan pääasiassa kreosoottikyllästeisissä pylväissä. Kyllästyksen huono tunkeutuminen puuhun lisää lahottumisen riskiä. Sisälaho tekee pylvään rankenteesta putkimaisen. Se on siis sisältä laho ja sillä on terve ulkokuori joka säilyttää pitkään pylvään lujuuden. Lisäksi ajan mittaan alaspäin valuva kreosoottiöljy vahvistaa lahonsuojasta riskisimmillä lahoalueilla.

Sisälahoa voi tulla myös pylvään rungon keskiosaan. Sitä voivat aiheuttaa askelrautojen ja pulttien reiät, ja huolimattomuudesta johtuvat työkoneiden tai työkalujen tekemät vauriot. Tikat saattavat tehdä koloja myös keskiosaan. Jos puun halkeama ylettyy pintapuusta kyllästämättömään tai huonosti kyllästettyyn puuhun, avaa se tien lahottajasienille tai jo varastointivaiheessa alkanut sisälaho aktivoituu. [8] Sisälahoa esiintyy kreosoottikyllästeisillä pylväillä ruskolahona, mutta on havaittu että hiekkamaassa ruskolahoa voi esiintyä myös vanhan kreosoottipylvään pinnalla. [17] Kuvassa 11 esitetään kreosoottikyllästeisen pylvään poikkileikkaus. Tummunut kohta puun sisällä on sisälahoa.

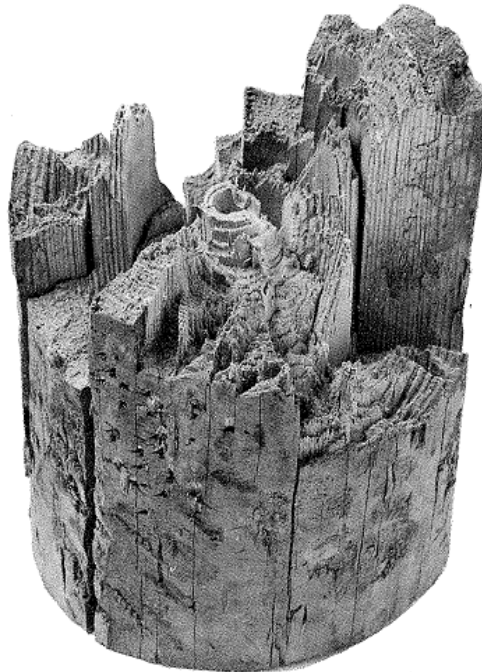


Kuva 11: Sisälaho kreosoottikyllästetyssä puupylväessä. [8]

Pintalahoa esiintyy pääasiassa suolakyllästeisillä pylväillä. Niitä ovat katkolaho ja ruskolaho. Suolakyllästeiden huuhtoutuminen pois puusta ja kyllästeen kemialliset muutokset antavat pintalaholle tilaa vähitellen menestyä. Katkolahoinen pylväs säilyttää muotonsa ja kovuutensa hyvin, mutta voi varoittamatta katketa jättäen tasaisen leikkauspinnan. [17] Kuvissa 12 ja 13 esitetään ruskolahon ja katkolahon esiintyminen kyllästetyssä pylväässä. Kuvassa 12 ruskolaho on edennyt sydänpuun reunaan. Kuvassa 13 taas katkolaho on käytännössä levinnyt koko puun läpi.



Kuva 12: Ruskolahoa CCA-kyllästeisessä pylväässä. [8]



Kuva 13: Katkolaho puupylväässä. [8]

Latvassa lahoaminen on harvinaisempaa ja hitaampaa kuin tyvessä, johtuen lahottajasienille epäedullisista ympäristötekijöistä. Lisäksi pylväissä käytetään latvasuojia jotka parantavat suojausta edelleen. Latvalahon riskiä kuitenkin lisää, jos puupylvästä lyhennetään latvasta kyllästyksen jälkeen. Myös halkeamat ja tikan tekemät pesät ja käpykolot saattavat lisätä lahoamisen riskiä.

Puupylväissä voidaan tavata myös harvinaisempaa valkolahoa. Sille tunnusomaista on pylvään muuttuminen vaaleaksi ja halkeilu vuosirenkaita pitkin. Lopulta pylvään puu muuttuu murenevaksi massaksi. [17]

3.6 Pylväiden käyttöikä

Pylväiden käyttöikää voidaan pidentää erilaisin huoltotoimin, esimerkiksi tukemalla niitä erilaisilla juurituilla sekä jälkikyllästyksellä. Paras ja kannattavin jälkisuojaus saadaan aikaan lahon alkuvaiheessa. Jälkisuojauksen ja pylvään alkuperäinen kylläste yhdessä pysäyttävät alkaneen lahoamisen. Laadukkaasti ja oikea-aikaisesti tehty suojaus säilyttää kunnan samana kahdeksasta kymmeneen vuoteen. [8]

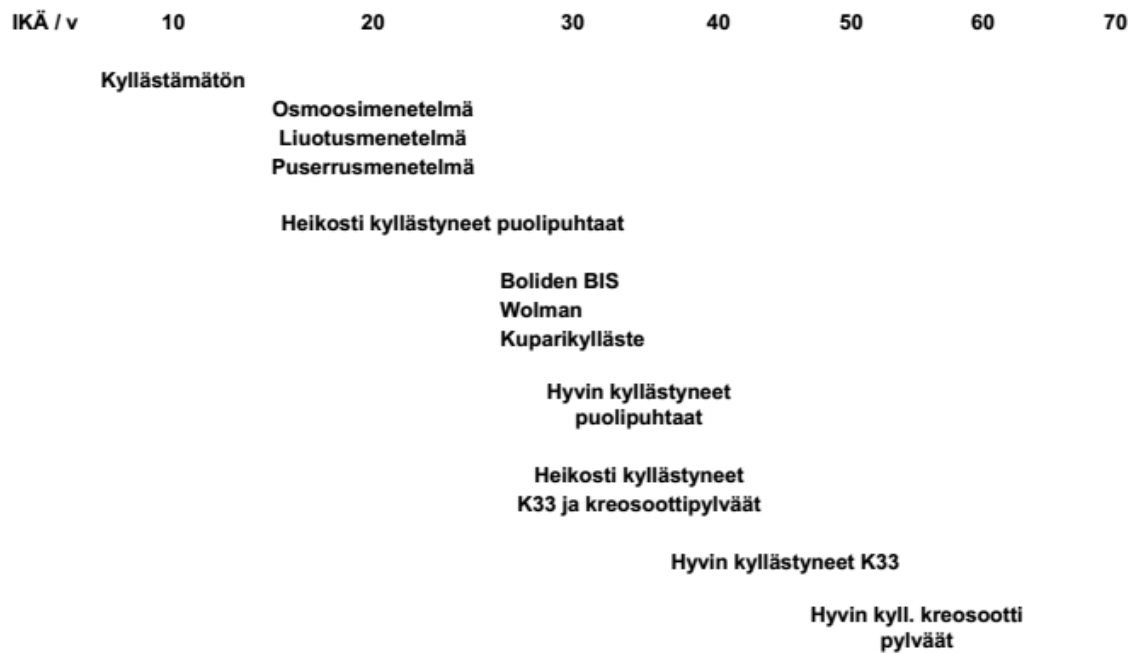
Suosituimpina menetelminä viime vuosikymmeninä ovat olleet Cobra-injektiomenetelmä sekä Wolmanit-kääremenetelmä. Nämä menetelmät ovat olleet suunnilleen yhtä hyviä. [37] Niiden vaikutus eroaa toisistaan joten eri lahotyypeille kannattaa käyttää niille parhaiten sopivaa menetelmää.

Cobra-injektiomenetelmä vaikuttaa eniten pylvään sisäkerroksissa ja sen teho pienenee nopeasti pintaan mentäessä. Siksi se onkin hyvä alkaneen sisälahon suojauksessa. Wolmanit-kääremenetelmä antaa tehokkaimman suojan puun pintakerroksissa ja pienenee mentäessä syvemmälle puuhun. Tämän vuoksi tätä suojausmenetelmää on käytetty alkaneen pintalahon torjuntaan. [37]

Cokratut pylväät voidaan erottaa mustasta tyvestä, joka johtuu terväkäsittelystä. Pylvääseen on myös kiinnitetty jälkikyllästysyhteydessä metallilaatta, jossa lukee jälkikyllästysvuosi. Wolmanit-käärityt pylväät voidaan erottaa muovikelmusta pylvään maarajassa. Pylvääseen on kiinnitetty myös jälkikyllästysnaula, josta menetelmän vuosiluku ilmenee. Tunnuksena niissä käytetään yleensä W-kirjainta esimerkiksi ”W 83”. [17]

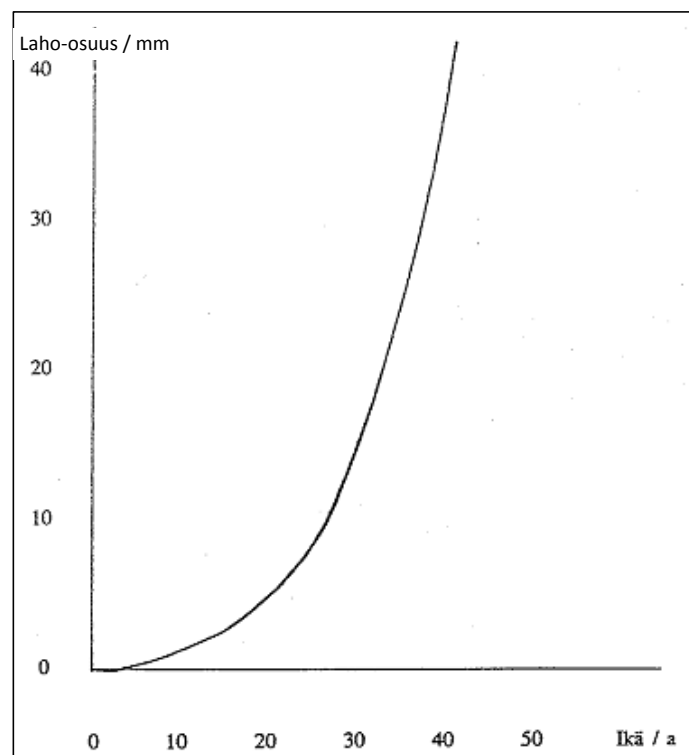
Juuritukina käytetään nykyään yhä enemmän teräksestä valmistettuja tukia. Niillä vahvistetaan pylvään alaosaa, joka voi olla heikentynyt lahon seurauksena. Muina materiaaleina on käytetty käytöstä poistetusta pylvästä työstettyjä uudelleen kyllästettyjä puutukia, kyllästettyä puutukea, kulmarautoja tai vastaavia [8].

Kuvassa 14 on Suomessa käytettyjen kyllästeiden keskimääräiset käyttöiät. Kylläste K33 on CCA-kylläste. Kuten kuvasta näkyy, on kyllästysprosessin laadulla ja kyllästeellä hyvin suuri vaikutus käyttöikään. Lisäksi nyt kielletty CCA-kylläste ja kreosootti ovat parhaita kyllästeitä. Jos kreosootti kielletään, joutuvat sähköyhtiöt miettimään tarkkaan uusia vaihtoehtoja pylväiden kyllästämiseen, tai vaihtamaan komposiitti-, betoni- tai metallipylväisiin.



Kuva 14: Puupylväiden käyttöikä eri kyllästeillä Suomessa. [16]

Pylvään lahoaminen kiihtyy käyttöiän loppua kohti. Tämä johtuu siitä, että kyllästysaine liukenee tai haihtuu pylvästä, jolloin lahottajasieni pääsee etenemään nopeammin. Kuvassa 15 on esitetty CCA-kyllästeisen puupylvään keskimääräinen rappeutumismalli. Rappeutuminen on kuitenkin hyvin yksilöllistä, joten kuva on vain suuntaa antava. Kun lahoisuus on noin 40 mm, pylväs on yleensä niin huonossa kunnossa että se täytyy vaihtaa uuteen.



Kuva 15: Keskimääräinen rappeutumiskäyrä CCA-kyllästeiselle pylväälle. [18]

3.7 Puupylväiden tulevaisuus

Tulevaisuudessa kreosoottiöljyn käyttö kyllästeenä näyttää hyvin epävarmalta. Siksi uusille tarpeeksi suojaaville ja ympäristöystävällisille kyllästeaineille on tilausta. Uusia puupylväiden kyllästysaineita voisivat olla esimerkiksi vesilasi, mäntyöljy tai niiden yhdistelmä. Myös C-kyllästykseen ja mäntyöljyn yhteiskyllästetyt puupylväät voisivat tulla käyttöön. Edellä mainituilla aineilla kyllästettyjen puupylväiden arvioitua käyttöikä on noin 50 vuotta.

Hajonta on kuitenkin suuri ympäristötekijöiden sekä puupylvään yksilöllisten ominaisuuksien vuoksi. Tämän vuoksi olisi ehkä kannattavaa lajitella puut lujuutensa mukaan ennen kuin ne otetaan käyttöön. Parempaan lujuuteen omaavat puut voitaisiin käyttää sähköjakelun kannalta kriittisemmissä paikoissa ja erittäin huonon lujuuden omaavat yksilöt hylättäisiin kokonaan.

Tulevaisuudessa myös komposiitti- ja teräspylväät yleistynevät, mutta tällä hetkellä ne häviävät kustannustehokkuudeltaan selvästi puupylväille. [11] Tilanne on sähköjakeluyhtiön kannalta haastava. Näyttää siltä ettei toistaiseksi ole kreosoottikyllästeelle yhtä kustannustehokasta ratkaisua tarjolla. Toisaalta tilanne voi kannustaa sähköjakeluyhtiöitä lisäämään maakaapelointia, koska maakaapeloinnin ja ilmajohtojen kustannuserot pienenevät.

4 Tarkastusmenetelmät ja laitteet

Pylväiden tarkastuksen tarkoituksena on havaita vaaralliset ja vikaantuneet pylväät, poistaa tai korjata ne takaisin toimintakykyisiksi. Tästä seuraa kunnonseuranta, koska puupylväät ikääntyvät yksilöllisesti ja ovat käyttöikänsä pitkäikäisiä. Edellä mainituista syistä onkin ensiarvoisen tärkeää pitää yllä tietokantaa tarkistettujen pylväiden kunnosta. Tulevaisuudessa saatetaan myös ottaa käyttöön lähilukuteknologia RFID (Radio Frequency IDentification), jossa puupylvääseen kiinnitetään kylkilappu johon voidaan tallentaa pylvään ominaisuuksista tietoa [11].

Tässä luvussa käydään läpi puupylvään kunnontarkastusmenetelmät sekä esitellään yleisimpiä laitteita, joilla tarkastus tehdään. Lisäksi kerrotaan mitä täytyy ottaa huomioon tarkastusta tehtäessä. Tarkastusmenetelmillä voi olla verkkoyhtiökohtaisia eroja, mutta pääpiirteissään ne seuraavat verkostosuosituksia RJ33:09 [17]. Lisäksi maantieteellisestä sijainnista johtuvat ilmastolliset erot ja niistä johtuvat kokemukset aiheuttavat tarkastustoimenpiteissä eroja.

Alaluvussa 4.3 kerrotaan myös kehittyneemmistä tarkastusmenetelmistä, sillä perinteiset menetelmät ovat hyvin alttiita virheille ja tarkastaminen on hidasta. Kuitenkin tällä hetkellä kehittyneimmät menetelmät ja laitteet ovat käytössä lähinnä laboratorioissa.

4.1 Tarkastuksessa huomioitavaa

Tarkastuksessa pyritään pääsääntöisesti määrittämään nykyinen tyvihalkaisija joka kertoo puun lahoisuudesta sekä lujuuden menetyksestä. Tarkastuksilla pyritään turvaamaan mahdollisimman turvallinen työympäristö. Tämä on myös tarkastuksen tärkein tavoite.

Työturvallisuudelle mahdollisesti vaaralliset pylväät merkitään yhdellä tai kahdella keltaisella varoitusnauhalla. Yksi keltainen nauha kertoo, että pylväs on tuettava ennen kuin asentaja kiipeää siihen. Kaksi keltaista nauhaa taas kieltää kiipeämisen pylvääseen kokonaan ja se täytyy vaihtaa. [17] Kuvassa 16 on pahoin lahonnut pylväs, joka on merkitty kahdella nauhalla.



Kuva 16: Pahoin lahonnut puupylväs. Kaksi keltaista nauhaa ilmoittaa ettei pylvääseen saa kiivetä. [38]

Lahoamisen ohella toinen tärkeä huomioon otettava asia puupylvään kestävydessä on tuuli- ja jääkuormat. Erityisesti, jos johtimet ovat normaalia suurempia, sekä jänneväli ja pylväät ovat normaalia pidempiä. Pidempi jänneväli lisää puun kuormitusta ja pidemmät pylväät eivät kestä kuormitusta yhtä paljon kuin lyhyemmät. Ottamalla ylimääräiset kuormat huomioon voidaan verkon sähkön toimitusvarmuutta lisätä. Rasituskohdat täytyy huomioida pylväskohtaisesti, niiden sijainnin ja käyttötarkoituksen mukaan, sillä ne voivat erota paljonkin toisistaan. Joihinkin pylväisiin rasitus kohdistuu maarajaan, kun taas toisiin se voi kohdistua pylvään keskikohtaan. [17] Suuren rasituksen

kohdistuminen maarajaan sekä lahoaminen voivat yhdessä lyhentää pylvään käyttöikää huomattavasti. Pylväiden kuntotarkastajien kannattaa ottaa tämä asia huomioon.

Tarkastaja määrittää tyvihalkaisijan lisäksi pylvään lahoisuusasteen. Tällä määrittelyllä pyritään helpottamaan tarkastusaineiston määrittelyä [17]. Lahoisuusasteessa otetaan huomioon terveen tyven halkaisija, ja tarkastajan harkinnan mukaan pylvään muu yleinen kunto. Esimerkiksi tikan pahasti tuhoama latvaosa voi alentaa lisätä lahoisuusastetta vaikka itse tyven lahoisuus ei tähän antaisikaan aihetta. Taulukossa 1 ja 2 kerrotaan kuinka lahoisuusaste määritellään.

Taulukko 1: Vanhempi lahoisuusasteluokitus pylväille.

Lahoisuusaste	Tunnusmerkit
0 terve	pinta terve ja kirkas, ei myöskään sisälahoa, pylväs alle 20 vuotta vanha
1 alkavaa lahoa	pehmennyttä tai tummunutta puuta enintään 2 mm pylvään ympäri
2 näkyvää lahoa	lahoa puuta ympäri pylvään 3-10 mm tai vastaava osuus poikkipinnasta
3 melkoista lahoa	lahoa puuta ympäri pylvään 11-20 mm tai vastaava osuus poikkipinnasta
4 pahoin lahonnut	lahoa puuta ympäri pylvään yli 20 mm tai vastaava osuus poikkipinnasta

Taulukko 2 on uusin lahoisuusastesuositus, mutta monet verkkoyhtiöt käyttävät vielä edellistä suositusta. Myös tässä diplomityössä käytetään taulukon 1 tapaa. Huomioitavaa on, ettei taulukoiden luokittelu sovellu sisälaholle.

Uudempi taulukossa määritellään tarkemmin myös muita tekijöitä kuin pylvään ympärillä olevaa lahoa. Lahoisuusasteeseen esimerkiksi vaikuttaa pylvään pituus. Pylvään pituuden huomioon ottaminen on perusteltua, sillä pidemmät pylväät lisäävät sen lujuusvaatimuksia.

Taulukko 2: Uudempi lahoisuusasteluokitus pylväille.

Lahoisuusaste	Tunnusmerkit
Lahoisuusaste 1	Pylväässä näkyvää lahoa tai pehmennyttä ja tummunutta puuta. Pylvään pituuden ollessa ≤ 11 metriä ja kun pylvään terve tyvihalkaisija on vähintään 15 cm. Tätä pidemmällä pylväillä 1 metrin lisäys pylväspituuteen lisää terveen tyvihalkaisijan mittaa 1 cm:llä. Terve tyvihalkaisija täyttää selkeästi lahoisuusasteen 2 ja 3 vaatimukset
Lahoisuusaste 2	Pylväässä lahoa ympäri pylvään. Pylvään pituuden ollessa ≤ 11 metriä ja kun pylvään terve tyvihalkaisija on ≤ 15 cm mutta kuitenkin vähintään 13 cm. Tätä pidemmällä pylväillä 1 metrin lisäys pylväs pituuteen lisää terveen tyvihalkaisijamittaa 1 cm:llä.
Lahoisuusaste 3	Pylväs pahoin lahonnut. Pylvään pituuden ollessa ≤ 11 metriä, ja kun pylvään terve tyvihalkaisija on ≤ 13 cm. Tätä pidemmällä pylväillä 1 metrin lisäys pylväs pituuteen lisää terveen tyvihalkaisijamittaa 1 cm:llä.

Kuten aiemmin todettiin, hyönteisten ja tikkojen aiheuttamat tuhot puupylväille ovat minimaaliset verrattuna lahoon. Ne täytyy kuitenkin ottaa tarkastuksissa huomioon. Visuaalisilla tarkastuksilla nämä tuhot saadaan yleensä selville. Kuvassa 17 on muurahaisten aiheuttama tuho pylväässä. Sen voi yleensä havaita pylvään juurelle kertyneestä purukasasta.



Kuva 17: Muurahaisten tuhoama pylväs. [19]

Kuvasta nähdään, että pylvään sisäosa on lähes ontto tai ainakin hyvin puruinen. Tämä alentaa pylvään lujuutta ja raivaa tietä lahottajasienelle puun sisäosiin. Puruisuus antaa lahottajasienelle myös paremmat mahdollisuudet menestymiseen.

4.2 Perinteiset menetelmät

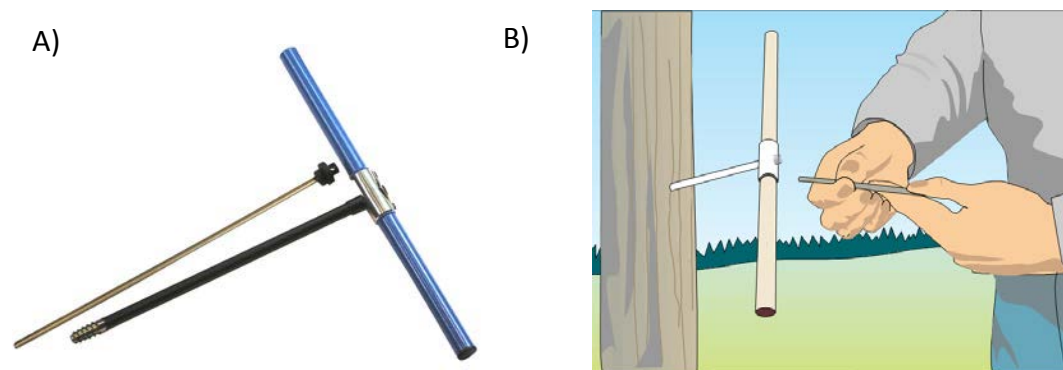
Puupylväitä voidaan tarkastaa monenlaisilla menetelmillä. Kuitenkin perinteiset menetelmät ovat toistaiseksi käytetyimpiä. Niitä ovat silmäily, piikkikoe, lastun veisto, koputtelu ja kairaus. Myös ns. lahokoiria käytetään lahon paikantamiseen jonkin verran Suomessa. Perinteisten menetelmien huono puoli on, että ne perustuvat pitkälti myös tarkastajan kokemukseen. Tällöin saatetaan altistua virheille [39]. Lisäksi perinteisillä menetelmillä tarkastaminen on suhteellisen hidasta. [17, 40]

Puupylvään tarkastus aloitetaan yleensä visuaalisella tarkastuksella joko silmämääräisesti tai kiikareilla. Varsinkin pylvään kriittisimmät kohdat tulee tarkastaa. Näitä ovat pylvään juuriosa, keskiosa ja latva. Esimerkiksi latvassa laho huomataan sammaloitumisesta. Jos pylväässä on jotakin huomautettavaa, on se hyvä kirjata muistiin ja aloittaa tarkempi tarkastus ajallaan. Visuaalinen tarkastus yleensä riittää, jos pylväs on alle 20 vuotta. [17]

Pylvään ikä voidaan todeta merkkauselevystä, joka on kiinnitetty pylvääseen ja siinä on standardin SFS 2662 [31] vaatimat merkinnät, kuten vuosiluku ja kyllästysaine. Yli 20 vuotta vanhojen pylväiden tarkastusta jatketaan poistamalla pylvään ympäriltä maata 20 - 40 cm:n syvyydeltä ja mittaamalla sieltä pylvään tyvihalkaisija. [17, 31, 40]

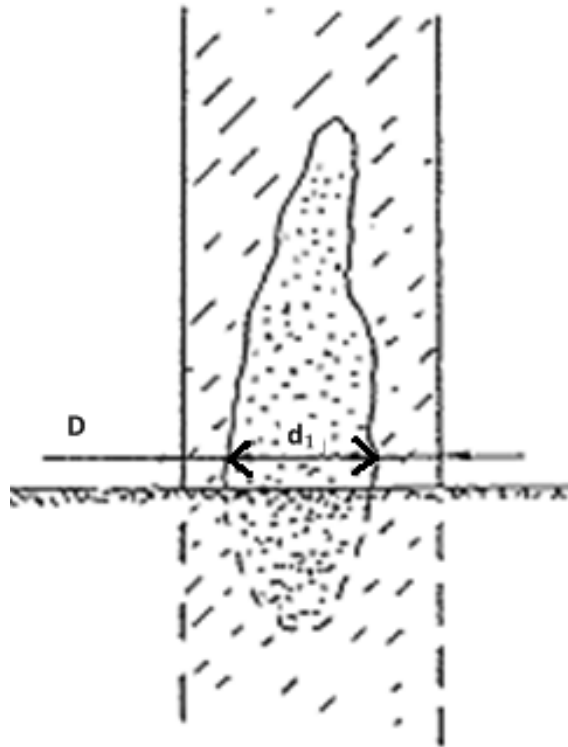
Seuraava vaihe on kuuntelu ja koputtelu – menetelmän käyttäminen. Se on yksinkertainen ja tehokas menetelmä etenkin sisälahon havaitsemiseen. Tarkastus suoritetaan koputtelemalla pylvästä 2 m:n korkeuteen esimerkiksi vasaralla. Samalla kuunnellaan kuulostaako pylväs ontolta, ja ontot kohdat merkitään. Näiden kohtien tutkintaa jatketaan ottamalla näyte kasvukairalla. Koputtelulla voidaan havaita myös pintalahoja, joka tekee usein pylvään pinnan pehmeäksi. [17, 40]

Kun pylväs on koputeltu ja mahdolliset lahohavainnot tehty, voidaan käyttää kasvukairaa. Kuvassa 18 A) on esitetty kasvukaira. Se koostuu itse kairasta (sininen osa) ja sen sisään tulevasta kourusta (metallin värinen osa). Kun puuta kairataan, kouruun syntyy puun läpileikkaus. Kourun voi poistaa kairauksen jälkeen kairasta, jolloin nähdään puun rakenteen läpileikkaus. Kuvassa 18 B) on havainnekuva kasvukairan käytöstä.



Kuva 18: Kasvukaira (A) ja sen käyttö (B). [40, 41]

Kasvukairalla otetaan poralastun näyte merkitystä kohdasta. Näytteestä voidaan todeta pylvään jäljellä olevan seinämän paksuus, sillä sisälaho tekee pylvään sisäosan ontoksi. Kun pylvään halkaisija ja ontion osan halkaisija ovat tiedossa (katso kuva 19), voidaan terveen tyven halkaisija määrittää käyttämällä apuna taulukkoa 3. Taulukon ylärivistä valitaan mitatun pylvään halkaisijan leveys, ja ensimmäisestä sarakkeesta ontion osan halkaisijan leveys. Näin saadaan terveen tyven halkaisija d . [17]



Kuva 19: Pylvään terveen seinämän paksuuden mittaaminen. Kasvukairan näytteestä se nähdään suoraan. Taulukkoa 1 apuna käyttäen voidaan määrittää terveen tyven halkaisija. D =pylvään tyvihalkaisija, d_1 = ontelon halkaisija.

Kun kuvaa 19 tarkastellaan, niin voida todeta että, perinteisin menetelmin terveen tyven määrittäminen on hyvin hankalaa lahon ollessa sisälahoa. Tämän vuoksi tarkastajan kokemuksella ja ammattitaidolla on suuri vaikutus tarkastuksen onnistumiseen.

Taulukko 3: Pylvään terveen tyvihalkaisijan määrittäminen taulukosta.

		D (cm)													
		31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18
d ₁ (cm)	22	28													
	21	29	27												
	20	29	27	27											
	19	29	28	27	26					d (cm)					
	18	30	29	27	26	25									
	17	30	29	28	27	26	24								
	16	30	29	28	27	26	25	24							
	15	30	29	28	27	26	25	24	23						
	14	31	30	28	27	26	25	24	23	22					
	13	31	30	29	28	27	25	24	23	22	21				
	12	31	30	29	28	27	26	25	23	22	21	20			
	11	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	20	19		
	10	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	
	9	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18

Sisälähön tunnistamisen jälkeen siirrytään pintalahon paikantamiseen. Yleisesti käytetyllä piikkitestillä voidaan tunnistaa katkolahoa. Piikki työnnetään kohtisuoraan pylvääseen ja taivuttamalla pyritään nostamaan puusta pala. Puu on tervettä, jos pala on lastumainen, säleinen ja sitkeä, sekä irrotessaan risahtaa. Katkolaho voidaan taas tunnistaa, jos palat ovat sileitä ja pyramidimaisia. Piikkitestiä jatketaan niin kauan kunnes tervettä puuta tulee vastaan. Testi tulee tehdä myös pylvään toiselle puolelle, ja tarvittaessa koko pylvään ympäri.

Lahon mahdollinen paikallisuus ja pistemäisyys on huomioitava tyveä määritettäessä. Terve tyvi saadaan kaavojen 1-4 avulla. Niissä lahon paikallisuus ja pistemäisyys on otettu huomioon. Kuva 20 havainnollistaa tyven määrittystä. [17]

$$d = D - \frac{s_1}{4} \quad (1)$$

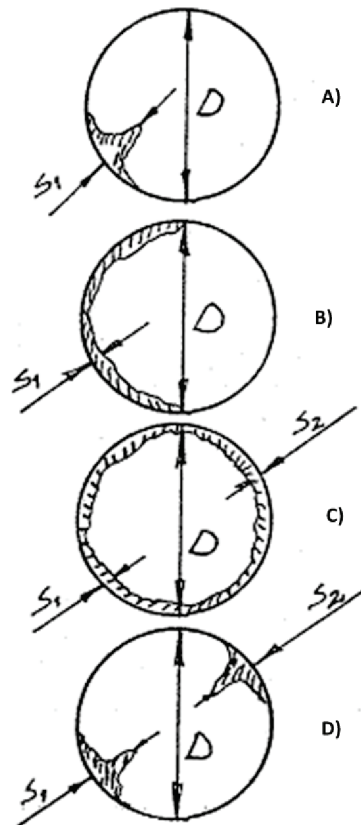
$$d = D - s_1 \quad (2)$$

$$d = D - (s_1 + s_2) \quad (3)$$

$$d = D - \frac{s_1 + s_2}{2} \quad (4)$$

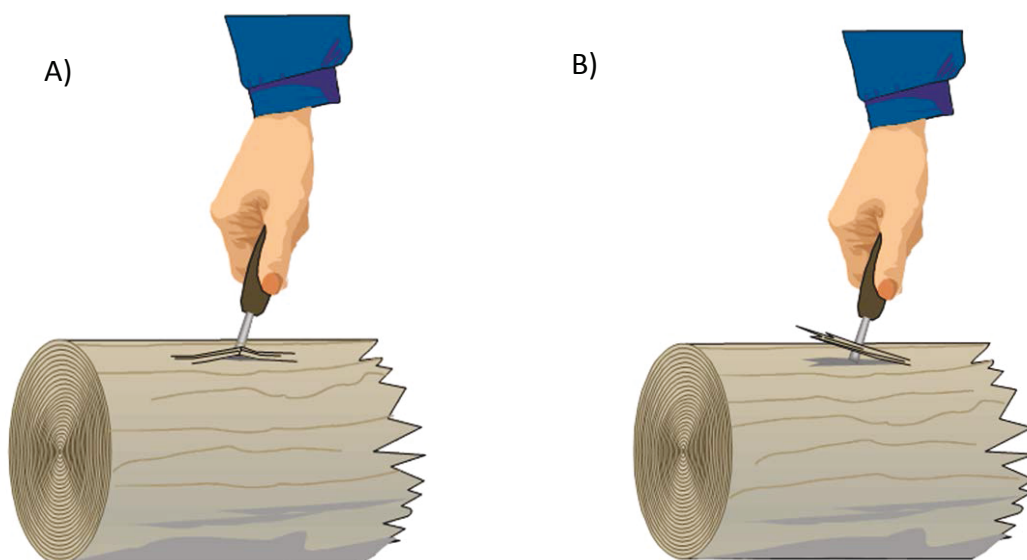
,joissa D = pylvään alkuperäinen halkaisija d = pylvään tyvihalkaisija ja s_x = lahon syvyys pylväässä.

Kaavoja 1-4 käytetään niin että esimerkiksi kuvan 20 A):n tapaukseen käytetään kaavaa 1, B) tapaukseen kaavaa 2, C) tapaukseen kaavaa 3 ja D) tapaukseen kaavaa 4.



Kuva 20: Terveen tyven halkaisijan laskeminen pylväästä. S=lahon syvyys pylväässä, D=pylvään tyvihalkaisija. Kuviiin sovelletaan kaavoja 1-4.

Piikkitestiä ei tule tehdä, jos puu on jäätynyt. Lisäksi vaikka puu olisi märkää, ei se tarkoita välttämättä lahoa. Ja toisaalta kova puu ei tarkoita välttämättä tervettä puuta. Lisäksi tarkastus tulee tehdä mahdollisimman huolellisesti, niin ettei tarpeetonta kaivamista tehdä, sillä se voi vaikuttaa lahon etenemiseen sekä pylvään lujuuteen. [8, 19] Kuvassa 21 on vielä havainnollistettu piikin käyttöä.

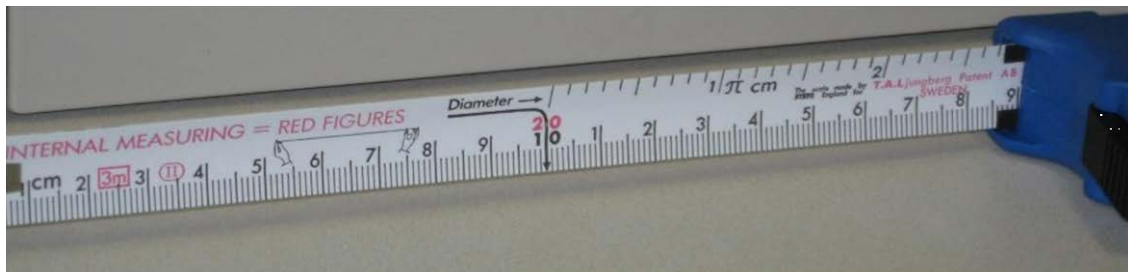


Kuva 21: Piikin käyttö pintalahon tunnistamisessa. [40]

Katkolahoa voidaan tunnistaa myös **Pilodyn**-laitteella, mutta tällöin on varmistuttava siitä, että laho on varmasti katkolahoa. Laitteesta laukaistaan piikki puun katkolahokohtaan. Sen uppoumasta nähdään suoraan lahon paksuus. Pilodyn on vähemmän altis inhimillisille virheille, mutta sitä tulee silti käyttää oikein. Lisäksi laitetta ei kannata käyttää hyvin kosteissa oloissa, sillä se on kalibroitu normaalikosteuden olosuhteisiin. [8]

Pylvään pinnalla voi olla myös ruskolahoa. Tämän tunnistaa hiiltyneen näköisestä tyvestä. Tällöin terveen tyven halkaisija saadaan poistamalla laho kirveellä terveeseen puuhun saakka ja käyttämällä kaavoja 1-4 piikkitestin tapaan. [17]

Pintalahoa voidaan myös mitata suoraan käyttämällä esimerkiksi kuvan 22 mukaista ns. piimittaa. Se kierretään pylvään ympäri tyvestä ja luetaan nuolen osoittamasta kohdasta halkaisijan lukema. Kuvan mitassa halkaisijan luvut ovat mitan yläosassa. Laho on kuitenkin ensiksi havaittava ja poistettava ennen mitan käyttämistä.



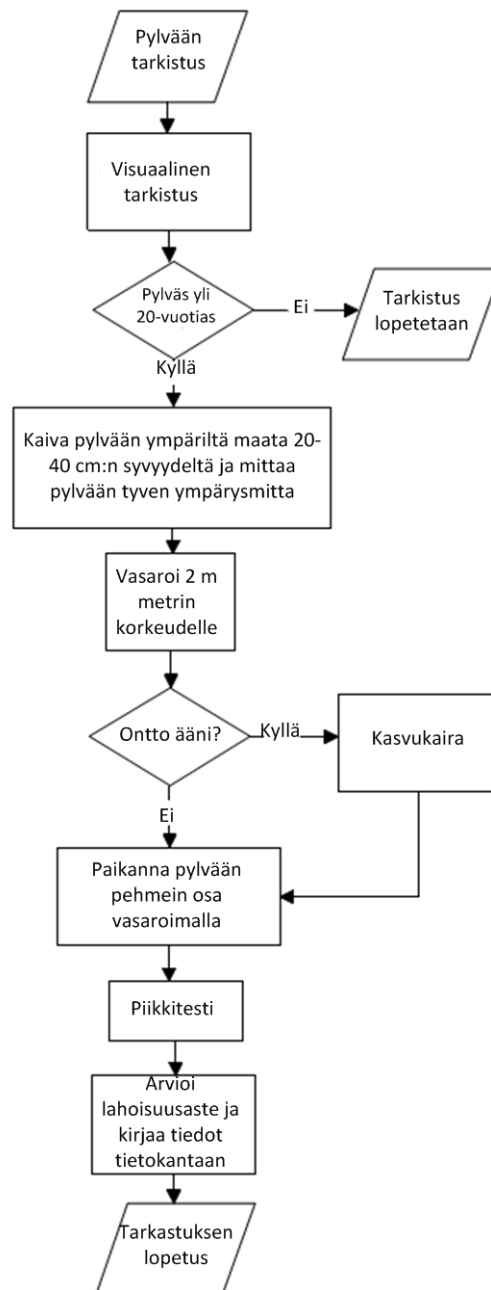
Kuva 22: Piimitan avulla voidaan tyven halkaisija mitata suoraan. [42]

Lahoa havaitaan myös lahokoirien avulla Suomessa. Ne paikantavat varsin tehokkaasti mahdolliset lahot pylväistä. Esimerkiksi Lapissa käytetyn lahokoiran tarkastusnopeus oli noin 120 pylvästä päivässä [43]. Tarkastaja tekee tarkemman tutkimuksen lahokoiran merkittyä pylvään, kuten kuvasta 23 nähdään. [44, 45]



Kuva 23: Tarkastaja ja lahokoiria tekemässä tarkempaa tarkastusta koiran merkkaukselle puupylväälle. Koirat merkkauksella lahoon pylvään puremalla. [43]

Tässä luvussa on kuvailtu yleisesti käytössä oleva lahoisuustarkastus. Se voidaan esittää kokonaisuudessaan prosessikaaviona, jotta tarkastuksen eteneminen vielä selkeytyisi. Kuvassa 24 esitetään tarkastuksen eteneminen.



Kuva 24: Lahoisuustarkastuksen eteneminen esitettynä prosessikaaviolla. [40]

Kuten prosessikaaviosta nähdään, on perinteinen tarkastusmenetelmä aikaa vievää ja sen onnistuminen on hyvin paljon kiinni tarkastajan kokemuksesta. Tämä tarkastusmalli on kuitenkin toistaiseksi hallitseva menetelmä, vaikka onkin yritetty kehittää uusia parempia ja nopeampia laitteita sekä tapoja tehdä lahoisuustarkastus. Seuraavassa alaluvussa esitellään niistä joitakin menetelmiä.

4.3 Kehittyneemmät menetelmät

Edellä mainitut menetelmät perustuvat pitkälti tarkastajan kokemukseen, ja ovat siksi alttiita inhimillisille virheille. Esimerkiksi koputusäänen tulkinta voi olla hyvinkin vaikeaa puun yksilöllisistä tekijöistä johtuen, joten tarkastajan kokemus on ensiarvoisen

tärkeää. Lisäksi tarkastus on suhteellisen hidasta. Tästä syystä on kehitetty ja kehitetään vähemmän inhimillisille virheille alttiita menetelmiä ja laitteita jotka olisivat vielä perinteisiä menetelmiä nopeampia. Näistä useimmat ovat kuitenkin vielä tutkimus- tai testausvaiheessa. Kehittyneitä laitteita ovat muun muassa ääniaaltolaitteet, röntgenlaitteet, lujuuden mittaustaite ja yhdistetty tiheys- ja kosteuspitoisuusmittari. [17, 40]

Röntgensäde ja ydinmagneettinen resonanssitekniikka eli NMR-tekniikka (nuclear magnetic resonance) joiden avulla voidaan ilmaista pylvään tiheys. Ne perustuvat röntgensäteilyyn ja ydinmagneettiseen resonanssiin. Niiden ja tietokoneohjelmien avulla voidaan pylväästä saada kaksi- tai kolmiulotteinen kuva sen sisältä, sekä sen lujuus. Hyvää menetelmissä on se, etteivät ne tee jälkiä pylvääseen, eli ne ovat ainetta rikkomattomia tarkastusmenetelmiä (Nondestructive testing method (NDT)). Säteilyyn perustuvia menetelmiä käytetään toistaiseksi ainoastaan laboratorio-olosuhteissa. [40] Esimerkiksi röntgensäteeseen perustuva tekniikka ei pysty tunnistamaan vasta alkanutta lahoa, koska sen vaikutus puun tiheyteen on vielä vähäinen. [46]

Lahon poraus -menetelmä perustuu siihen, että sitä varten kehitetty pora mittaa sen kohtaamaa vastusta eli puun tiheyttä, kun sen terä tunkeutuu puun sisään. Vastuksen arvoista voidaan päätellä onko puu pehmeää vai kovaa, ja jatkaa tarvittaessa tarkempia tutkimuksia. Huonoa porauksessa on se, että se ei ole NDT-menetelmä. Poran ilmaisin (terä) jättää jäljet pylvääseen, vaikka onkin hyvin pieni, yleensä 1-2 mm.

Myös **ääniaaltoihin** perustuvia tekniikoita käytetään lahon paikantamiseen. Ne perustuvat äänen nopeuden etenemiseen puussa. Lahossa puussa ääni etenee hitaammin kuin terveessä. Tähän tekniikkaan perustuen on kehitetty monia erilaisia laitteita, sekä matalalla että korkealla taajuudella toimivia. Matalilla taajuuksilla toimivilla laitteilla on ongelmana havaita pieniä määriä lahoa. Tämä johtuu siitä että niiden aallonpituus voi olla pidempi kuin itse pylvään läpimitta. Korkealla taajuudella toimivilla laitteilla ei tätä ongelmaa ole. Toisaalta ultraäänilaitteiden käyttö voi olla työlästä ja hidasta. [40, 46]

Kehittyneimpiä laitteita tai niiden antamia tietoja voidaan käyttää erilaisissa mallinnusohjelmissa, jotka muodostavat kuvan lahoutuneesta osasta. Näin niiden avulla saadaan selville jäljellä oleva lujuus ja muita kuntoon liittyviä tekijöitä. [47-49]

5 Aineisto ja aikaisempi tutkimus

Tässä luvussa esitellään tutkimuksen aineisto sekä luodaan katsaus aikaisempaan tutkimukseen. Alaluvussa 5.1 kerrotaan millainen aineisto on kyseessä ja miten sitä on jouduttu muokkaamaan ennen tutkimuksen tekoa. Alaluvussa 5.2 esitellään aikaisempaa tutkimusta sähkönjakeluverkkojen puupylväiden rappeutumisesta.

5.1 Aineisto

Aineisto saatiin Loiste Sähköverkko Oy:ltä. Se käsittää yhteensä 8914 kpl kuntotarkastettuja puupylväitä. Ne on tarkastettu kesän 2014 aikana. Pääsääntöisesti pylväät on valittu tarkastuksen kohteeksi, jos ne on istutettu 1970-luvulla.

Aineiston tiedot on kerätty pylväisiin kiinnitetyistä metallilaatoista (ks. kuva 10) ja tekemällä lahoisuustarkastus verkostosuositus RJ33:96:n (vanhempi suositus) mukaisesti. Lisäksi maaperä ja perustustiedot on todettu paikan päällä. Tärkeimmät pylvästiedot tämän tutkimuksen kannalta ovat

- pylvään kyllästysvuosi
- kyllästeaine
- paikkakoordinaatit etrs-tm35fin muodossa
- maaperä
- laholuokka
- alkuperäinen halkaisija
- nykyinen halkaisija
- perustustapa.

Tutkimuksessa oletetaan kyllästysvuoden olevan sama kuin pylvään istutusvuosi. Lahoisuus saadaan vähentämällä alkuperäisestä halkaisijasta nykyinen halkaisija. Lisäksi aineistosta suodatetaan pois seuraavat tiedot ennen tutkimuksen aloittamista:

- Tutkimukseen otetaan vain CCA-kyllästeiset pylväät. Muut pylväät poistetaan.
- Puutteellisia tietoja omaavat pylväät poistetaan.
- Jos pylvään lahoisuudeksi saadaan negatiivinen luku, pylvästä ei oteta tutkimukseen mukaan.
- Yli 20-vuotiaita pylväitä, joiden lahoisuusaste on vielä 0, ei oteta tutkimukseen mukaan, koska näitä pidetään kirjausvirheinä. Tutkimuksessa oletetaan että yli 20-vuoden ikäisissä pylväissä oletetaan lahoisuuden jo alkaneen [17]. Näitä pylväitä aineistossa oli 2 kpl.
- Jos pylväiden maaperän perustustapaa on alle 15 kpl aineistossa, kyseinen perustustapa eli pylväät poistetaan. Tällöin saadaan luotettavampia keskiarvoja sekä hajontoja maaperille ja perustustavoille, joita voidaan verrata keskenään. Lisäksi otoksien tuloksia voidaan pitää riittävän tarkkoina koko populaatiolle.

Maaperät tunnistettiin paikan päällä ja ne jaettiin seitsemään luokkaan, joita olivat

- hieno hiekka
- kallio
- karkea hiekka / moreeni
- kivitäyttö
- multaperäinen maa
- savimaa / siltti
- turve.

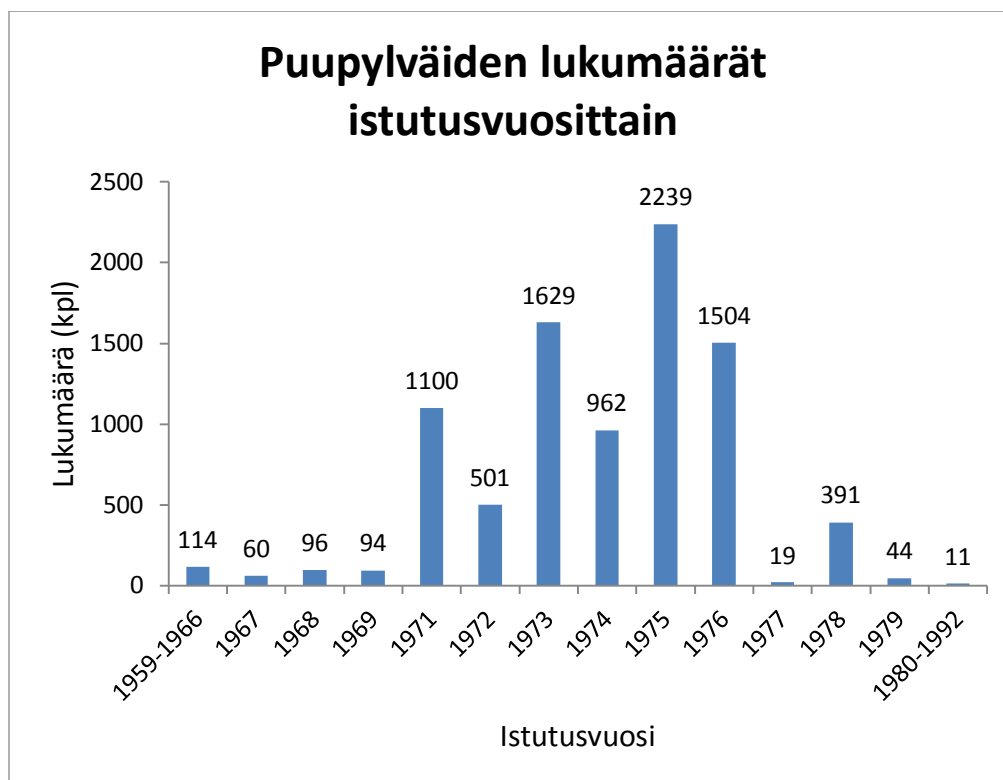
Myös perustustavat tunnistettiin paikan päällä. Kun perustustavoista poistettiin alle 15 kappaleen pylvään otokset, jäivät seuraavat perustustavat tutkimukseen

- kalliopylväs metsämaa
- maapylväs metsämaa
- maapylväs pelto
- maapylväs puutarha / piha
- maapylväs suo
- maapylväs taajama / kaava-alue
- maapylväs tiealue.

Laholuokat on jaoteltu taulukon 2 mukaan asteikolla 0-4. Alkuperäinen halkaisija on saatu pylvään tunnistelaatasta, ja nykyinen halkaisija on saatu käyttämällä verkostosuosituksessa ehdotettuja menetelmiä.

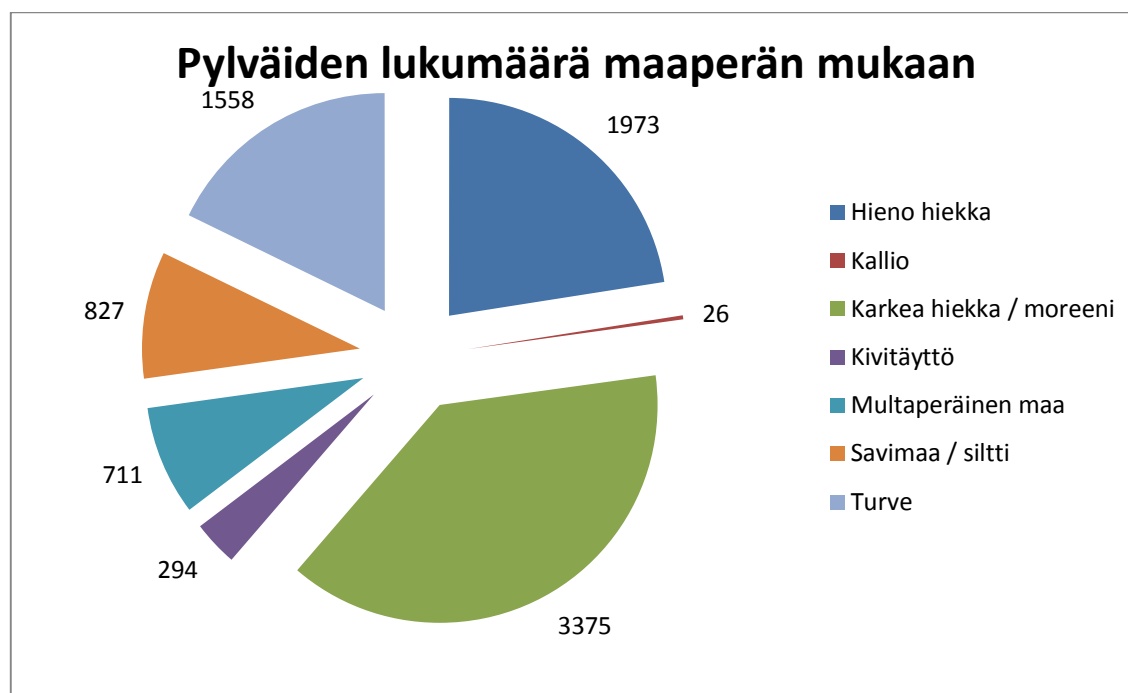
Jos joitakin näitä tietoja ei ole ollut aineistossa, kyseinen pylväs on poistettu tutkimuksesta. Kun kaikki edellä esitellyt aineiston muokkaukset tehdään, jää jäljelle tutkimuksen kohteeksi 8764 pylvästä. Aineistosta jouduttiin siis poistamaan 150 kpl pylvästä edellä mainituin ehdoin.

Kuvassa 25 esitetään tutkimukseen otettujen pylväiden lukumäärät istutusvuosittain. Kuvasta nähdään, että suurin osa pylväistä on istutettu 1970-luvun alkupuolella. Tarkemmat maaperäkohtaiset ikätiedot on esitetty liitteessä A.



Kuva 25: Tarkastettujen pylväiden ikäjakauma.

Kuva 26 esittää pylväiden lukumäärän maaperän mukaan. Kuvasta nähdään, että eniten tarkastettuja pylväitä löytyy karkea hiekka / moreeni -maaperästä. Kyseinen maalaji on yleisin Suomessa. Seuraavaksi eniten pylväitä löytyy maaperistä hieno hiekka ja turve. Huomioitavaa tutkimuksen kannalta on kalliopylväiden vähäinen määrä verrattuna muihin maaperiin.



Kuva 26: Pylväiden lukumäärät maaperien mukaan.

Maaperän ohella myös perustustavat on havaittu ja kirjattu ylös lahoisuustarkastuksen yhteydessä. Taulukossa 4 on esitelty perustustapojen prosentuaaliset jakaumat maaperien mukaisesti. Taulukosta nähdään, että maapylväs metsämaa ja maapylväs pelto ovat yleisimpiä perustustapoja. Taajama-alueella ja tiealueella perustettuja pylväitä on sen sijaan vähän.

Taulukko 4: Perustustapojen prosentuaaliset jakaumat maaperien mukaan.

	Kalliopylväs metsämaa	Maapylväs metsämaa	Maapylväs pelto	Maapylväs puutarha / piha	Maapylväs suo	Maapylväs taajama / kaava-alue	Maapylväs tiealue
Hieno hiekka	1,27 %	93,36 %	1,82 %	0,86 %	1,72 %	0,96 %	0,00 %
Kallio	100,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Karkea hiekka / moreeni	4,62 %	90,13 %	1,57 %	1,16 %	0,00 %	1,54 %	0,98 %
Kivitäyttö	9,18 %	79,93 %	10,88 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Multaperäisen maa	0,00 %	43,32 %	48,24 %	5,77 %	0,00 %	2,67 %	0,00 %
Savimaa / siltti	0,00 %	92,38 %	2,18 %	0,00 %	5,44 %	0,00 %	0,00 %
Turve	0,00 %	63,67 %	0,96 %	0,00 %	35,37 %	0,00 %	0,00 %

Taulukossa 5 esitetään pylväiden lukumäärät lahoisuusluokkien mukaan. Lahoisuusluokat on laskettu uudestaan taulukon 1 mukaan katsomalla pelkästään tyven lahoisuutta. Näin varmistutaan siitä, että lahoisuusluokitus koskee ainoastaan tyven lahoa eikä muita pylväissä havaittuja vaurioita.

Taulukko 5: Pylväiden lukumäärät eri lahoisuusluokissa maaperän mukaan.

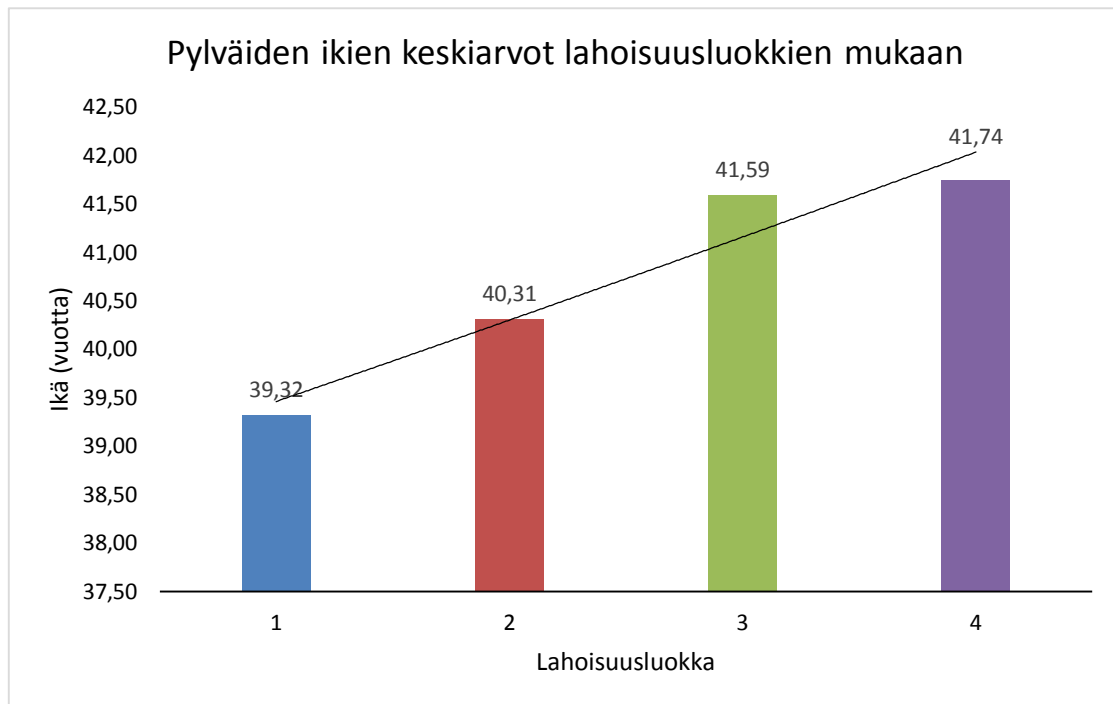
Maaperä	1	2	3	4	Yhteensä
Hieno hiekka	368	1577	21	7	1973
Kallio	15	10	1	0	26
Karkea hiekka / moreeni	527	2804	33	11	3375
Kivitäyttö	25	264	3	2	294
Multaperäinen maa	56	629	21	5	711
Savimaa / siltti	112	714	1	0	827
Turve	360	1179	13	6	1558
Yhteensä	1463	7177	93	31	8764

Taulukosta 5 nähdään, että tarkastettujen pylväiden kunto painottuu lahoisuusluokkiin 1 ja 2. Tämä johtuu osittain siitä, että pylväskanta on suhteellisen nuorta. Toiseksi huonokuntoisimmat pylväät, jotka kuuluvat laholuokkiin 3 ja 4, on jo poistettu, jotta voitaisiin välttää huonokuntoisten pylväiden katkeaminen. Jäljelle ovat siis jääneet vain ikäluokkien hyväkuntoisimmat pylväät. Tämä täytyy ottaa huomioon pylväiden rappeutumiskäyriä laskettaessa.

Aineiston pylväiden lahoamisnopeutta ei siis voida suoraan käyttää keskimääräisen koko populaation pylvään käyttöiän määrittämiseen. Aineistossa ei ole jo poistettuja pylväitä, jotka ovat kunnoltaan laholuokassa 4 tai lähellä sitä. Tietoa siitä, kuinka paljon 70-luvulla istutettuja pylväitä on jouduttu korvaamaan uusilla, ei ole. Tämä vaikeuttaa rappeutumiskäyrien piirtämistä koko populaatiolle.

Aineisto siis käsittää suurimmilta osin vain hyvin säilyneet pylväät. Siinä kuitenkin on joitakin kymmeniä laholuokkaan 4 kuuluvia puupylväitä, jotka jätetään tutkimuksen ulkopuolelle lahoamisnopeuksien keskiarvoja laskettaessa. Näin saadaan vertailukelpoisempia tuloksia, kun missään vertailtavassa ympäristössä ei ole laholuokkaan 4 kuuluvia pylväitä.

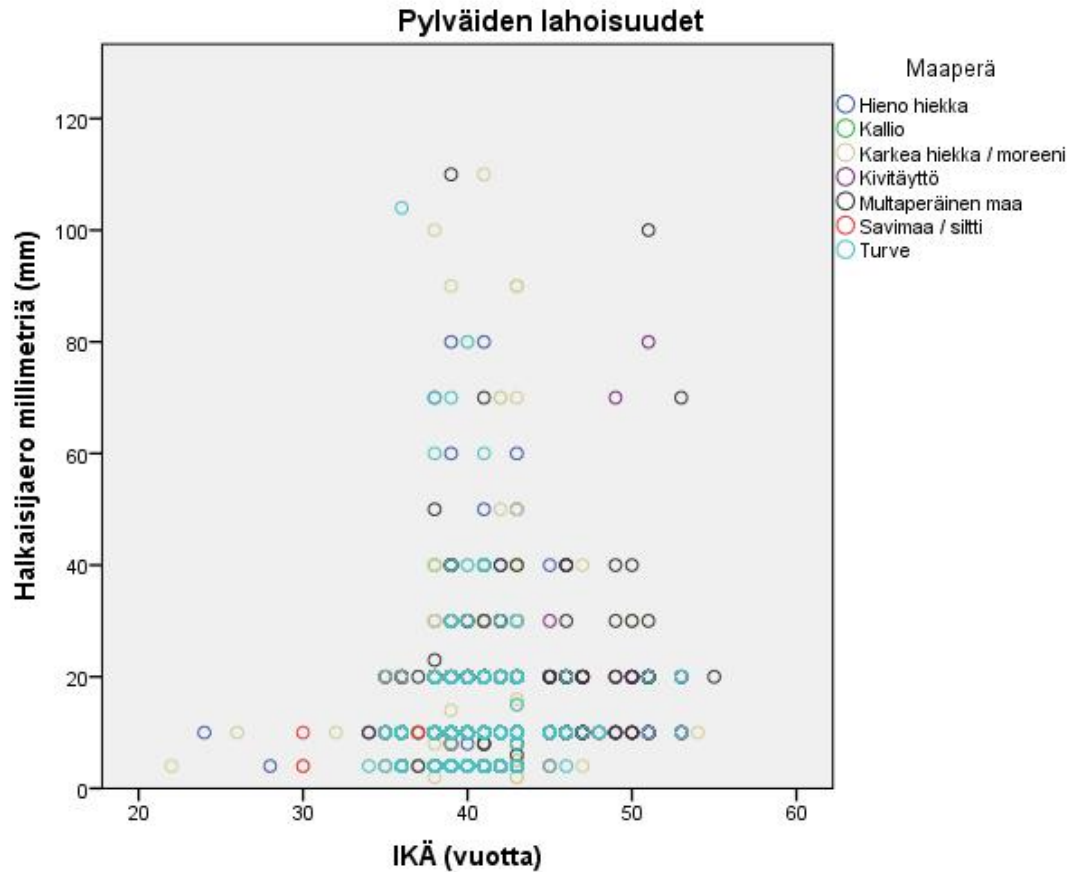
Kuvassa 27 on esitetty koko aineiston ikien keskiarvot laholuokkien mukaan. Kuten kuvasta nähdään, on ikien välillä hyvin vähän eroja. Tämä johtuu siitä että tarkastuksien alaisena ovat olleet pääasiassa 70-luvulla istutetut pylväät. Kuvasta kuitenkin nähdään kasvavaa trendiä iän suhteen kun lahoisuusluokka kasvaa.



Kuva 27: Aineiston pylväiden keski-ikä laholuokkien mukaan. Kuvaan on piirretty trendiviiva, joka osoittaa iän kasvavan kun lahoisuusluokka kasvaa.

Lahoisuus on laskettu vähentämällä alkuperäinen halkaisija nykyisellä halkaisijalla. Alkuperäinen halkaisija saatiin pylvään metallilaatan tiedoista, ja nykyinen halkaisija mitattiin verkostosuosituksen ohjeistusten mukaisesti.

Aiemmin todettiin, että nykyisen halkaisijan määrittäminen on hyvin hankalaa ja virhealtista. Tämä voidaan myös nähdä tässä aineistossa. Kuvassa 28 esitetään lahoisuus iän ja maaperän mukaan. Pylväiden lahoisuudessa nähdään selvää kerroksellisuutta, eli lahon määrä pylväissä painottuu suurimmilta osin laholuokkien mukaan. Tämä viittaisi siihen, että mittauksien tuloksia on pyöristetty laholuokkien mukaan. Se siis aiheuttaa systemaattista virhettä ja epävarmuutta tilastollisissa analyysissä.



Kuva 28: Pylväiden lahoisuudet ikien mukaan. Kuvassa nähdään selvää kerroksellisuutta. Halkaisijan eron keskiarvo aineistolle on 10,3 millimetriä ja ikä 40,16 vuotta.

Systemaattinen virhe, ja siten myös aineiston tietojen epätarkkuus, kannattaa pitää mielessä tuloksia tulkittaessa. Taulukossa 6 vielä selvennetään, että pylväiden mitatut lahoisuudet painottuvat lahoisuusluokkien mukaisesti. Ne on merkitty lihavoituina taulukkoon. Taulukosta nähdään, että peräti 6431 pylväällä lahoisuus on 10 mm. Tämä vaikuttaa hyvin epäuskottavalta, kun tiedetään kuinka monet eri tekijät lahoisuuteen vaikuttavat.

Taulukko 6: Pylväiden lukumäärät maaperien ja lahoisuuksien mukaan.

Lahoisuus millimetriä (mm)	Hieno hiekkä	Kallio	Karkea hiekkä / moreeni	Kivitäyttö	Multaperäinen maa	Savimaa / siltti	Turve	Yhteensä
2			3					3
4	368	15	524	25	56	112	360	1460
5			3					3
6					1			1
8	4		19		3	2	3	31
10	1444	10	2546	205	486	662	1078	6431
14			1					1
15			2				1	3
16			1					1
20	129		232	59	139	50	97	706
23					1			1
30	13		18	1	11	1	8	52
40	8	1	15	2	9		5	40
50	2		2		1			5
60	2						2	4
70	1		3	1	2		2	9
80	2		1	1			1	5
90			3					3
100			1		1			2
104							1	1
110			1		1			2

Pylväiden keski-iat eroavat toisistaan eri maaperissä. Taulukossa 7 ne esitetään yhdessä lahoisuuden keskiarvojen kanssa. Lisäksi taulukossa on ikien ja lahoisuuksien keskihajonnat. Taulukosta nähdään, että kivitäyttö eroaa iältään huomattavasti muista. Eroavaisuudet täytyy ottaa huomioon lahonopeuksia tutkittaessa, sillä lahoisuuden kasvaminen ei ole lineaarista ajan suhteen.

Eroavaisuudet otettiin tutkimuksessa huomioon siten, että pylvään lahonopeus jaettiin vielä sen maaperän perustustavan iän keskiarvolla, johon pylväs kuului. Jos näin ei olisi tehty, olisi kivitäyttö ollut nopeimmin lahoavien maaperien joukossa, sillä myös sen lahoisuuskeskiarvo on suuri. Tarkempi kuvaus lahonopeuksien laskemisesta annetaan luvussa 6.

Taulukko 7: Pylväiden ikien ja lahoisuuksien keskiarvot keskihajontoineen.

Maaperä	Iän keskiarvo (vuotta)	Iän keskihajonta (vuotta)	Lahoisuuden keskiarvo (mm)	Lahoisuuden keskihajonta (mm)
Hieno hiekkä	39,55	1,82	9,98	5,52
Kallio	39,58	1,86	7,69	7,22
Savimaa / siltti	39,70	2,00	9,81	3,38
Turve	40,12	2,15	9,68	6,01
Karkea hiekkä / moreeni	40,18	2,26	10,20	5,95
Multaperäinen maa	40,67	2,86	12,67	8,43
Kivitäyttö	44,37	4,59	12,21	7,40
Yhteensä	40,16	2,45	10,28	6,03

5.2 Aikaisempi tutkimus

Akateemista tutkimusta sähköjakeluverkon puupylväiden ikääntymisestä on tehty yllättävän vähän verrattuna siihen, kuinka suuria pylväiden ikääntymisestä johtuvat kustannukset voivat olla. Tiukentuneet turvallisuus- sekä sähkön laatu- ja toimituskriteerit ovat lisänneet sähkökatkoista aiheutuvia kustannuksia merkittävästi, joten uudelle tutkimukselle on tilausta.

Sähköjakeluverkkojen puupylväiden lahoamiseen, rappeutumiseen ja ikääntymiseen liittyviä tutkimuksia on tehty maailmalla jonkin verran, esimerkiksi Vidor et al., Welte ja Kile, Refnaes et al., sekä Li et al. [22, 50-52]. Suomessa puupylväiden lahoamista ja ikääntymistä ovat tutkineet muun muassa Lehtonen [14] ja Auvinen [53].

Monessa tutkimuksessa kritisoidaan perinteisten tarkastusmenetelmien epäluotettavuutta, koska inhimillisen virheen riski on suuri mittausta tehtäessä. [22, 39, 51]. Myös tämän diplomityön aineistossa oli havaittavissa mittavirheiden olemassaolo, josta kerrottiin kuvan 28 ja taulukon 6 yhteydessä.

Lisäksi perinteinen tarkastusmenetelmä liioittelee lujuuden heikkenemistä joidenkin tutkimusten mukaan [22, 54]. Kun otetaan edellä mainittu tekijä huomioon tarkastamalla myös puun lujuus lahoisuustarkastuksen yhteydessä, saadaan tarkemmat jäljellä olevat käyttöiät tarkastetuille pylväille [49]. Lujuuden mittaamista kenttäolosuhteissa rajoittaa kuitenkin mittalaitteiden ja menetelmien monimutkaisuus.

Tilastollinen tutkimus vaatii oikeanlaista dataa ja mahdollisimman paljon sitä, jotta tutkimuksesta saataisiin luotettavampi. Aikaisempaa tutkimusta tarkasteltaessa nähdään suurta hajontaa, joka voi olla seurausta puiden yksilöllisistä tekijöistä, ympäristötekijöistä, datan laadusta [51] sekä tarkastusmenetelmistä.

Jotkin tutkimukset [14, 22, 55, 56] myös laajentavat pylväiden ikääntymisen tutkimusta taloudelliseen optimointiongelmaan, jolloin malleihin lisätään myös taloudellinen näkökulma: esimerkiksi pylvään mahdollisen kaatumisen seurauksena tulevat keskeytyskustannukset. Pyritään siis löytämään mahdollisimman optimaalinen pylvään tarkastus- tai uudistamisajankohta, jolloin taloudellinen hyöty maksimoituu. Mallia voidaan myös laajentaa etsimällä verkon kriittisimmät kohdat keskeytyskustannusten kannalta.

Puupylväistä tehdyn analyysin johtopäätöksiä voidaan käyttää vain sellaisissa olosuhteissa, jossa ne ovat tarkastettu. Pylväiden lahoamiseen vaikuttaa niin moni muuttuja, että tulokset eivät ole päteviä muualla kuin siellä mistä data on saatu. [51] Tuloksien käyttämistä tutkittavan alueen ulkopuolella on siis syytä harkita huolella.

Aikaisemman tutkimuksen yhteenvetona voidaan todeta, että juurikin CCA-pylväiden lahoisuuden tutkiminen eri ympäristöissä on hyvin vähäistä. Monessa eri tutkimuksessa kritisoidaan perinteisiä tarkastusmenetelmiä, koska niitä käytettäessä inhimillisen virheen riski suuri. Niiden käyttö voi siis vääristää tuloksia, mikä täytyy myös tämän diplomityön tuloksia tarkastellessa sisäistää.

6 Tutkimusmenetelmät ja tulokset

Tämän diplomityön tarkoituksena on analysoida ja löytää eroavaisuuksia pylväiden lahoamisessa eri ympäristöissä annetun aineiston perusteella. Tutkimusmenetelmänä käytetään suhteellisten lahoamisnopeuksien vertailua. Tässä luvussa kerrotaan tutkimusmenetelmät ja niitä käyttämällä saadut tulokset. Lisäksi tilastollisen analyysin avulla tutkitaan tulosten luotettavuutta.

Tässä luvussa vertaillaan ensimmäisenä suhteellisia lahoamisnopeuksia maaperän ja perustustapojen mukaan. Tämän jälkeen esitellään alaluvussa 6.2 pylvään rappeutumiskäyrät, ja alaluvussa 6.3 vertaillaan pylväiden paikkakuntakohtaisia lahoamisnopeuksia. Viimeisessä alaluvussa 6.4 tarkastellaan tulosten luotettavuutta luotettavuusanalyysin avulla.

6.1 Suhteelliset lahoamisnopeudet

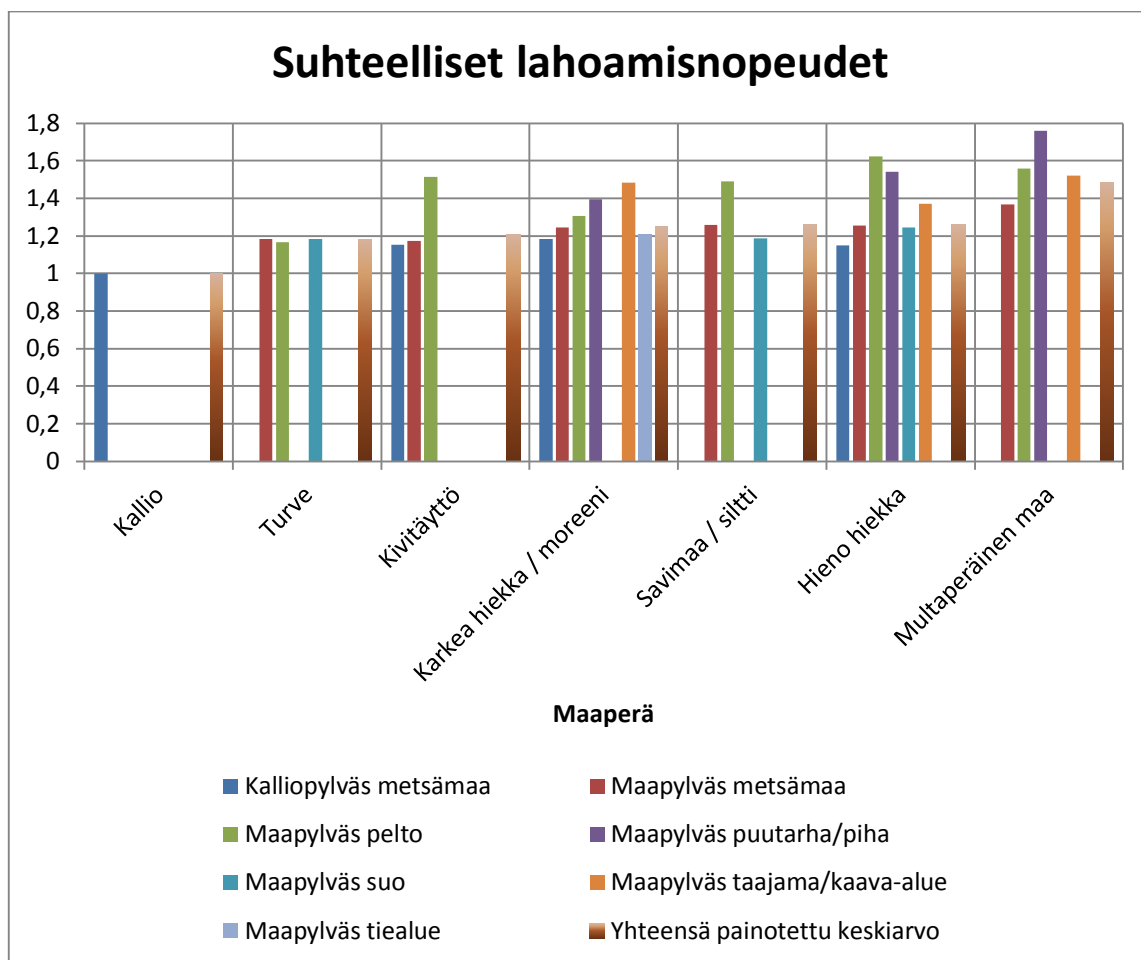
Tutkimusmenetelmäksi valittua suhteellista lahoamisnopeutta pylväiden rappeutumisen tutkimiseen voidaan perustella monella tavalla. Ensimmäiseksi lahoaminen ei ole lineaarista iän suhteen vaan kiihtyy ajan kuluessa. Lahoamisnopeuden suuruus siis riippuu millä ajan hetkellä lahoamista tutkitaan. Lisäksi ikien keskiarvot eri maaperien välillä vaihtelevat (ks. taulukko 7). Tämä ongelma on pyritty poistamaan jakamalla yksittäisten pylväiden lahoamisnopeus sen maaperän ja perustuksen iän keskiarvolla.

Aineiston avulla saadut tulokset eivät myöskään kerro koko pylväspopulaation lahoamisnopeudesta, koska otoksessa ei ole jo poistettuja huonokuntoisia pylväitä. Lisäksi aineisto käsittää pääasiassa vain 70-luvulla istutettuja pylväitä. Näin ollen koko pylväspopulaatiota käsittävä informaatio vääristyy, jos edellä mainittua ongelmaa ei oteta tutkimuksessa huomioon.

Suhteelliset lahoamisnopeudet on siis saatu laskemalla ensimmäisenä lahoamisnopeus yksittäisille pylväille. Tämän jälkeen on laskettu jokaiselle maaperälle perustuksen mukaan iän keskiarvo. Saadulla keskiarvolla jaetaan kyseisen maaperän ja perustuksen puupylvään lahoamisnopeus. Tämä tehdään kaikille pylväille. Edellä mainitulla tavalla maaperät saadaan keskenään vertailukelpoisiksi vaikka ikähajonnat eivät olekaan täysin samankaltaiset.

Seuraavaksi lasketaan saaduista tuloksista keskiarvot jokaiselle maaperälle perustuksien mukaan, sekä keskiarvot pelkille maaperille. Viimeisenä valitaan hitaimmin kasvava lahoamisnopeus perusarvoksi, johon muita verrataan. Keskiarvojen lisäksi lasketaan myös keskihajonnat eli standardipoikkeamat.

Perusarvoksi valittiin kallio, jolla oli aineistossa vain yksi perustustapa, eli kalliopylväs metsämaa. Kuvassa 29 on esitetty saadut suhteelliset lahoamisnopeudet maaperille ja perustustavoille.



Kuva 29: Suhteellinen lahoamisnopeus maaperän ja perustustavan mukaan.

Kuvassa 29 on suhteelliset lahoamisnopeudet laitettu maaperien painotetun keskiarvon mukaan pienimmästä suurimpaan vasemmalta oikealle. Tulokset ovat samankaltaisia aikaisemman tutkimuksen ja kokemuksen kanssa, vaikkakin karkea hiekka / moreenin, savimaa / siltin ja hienohiekan välisiä eroja voidaankin pitää pieninä.

Maaperistä nopeimmin lahoava on multaperäinen maa. Siinä pylväs lahosi lähes 1,5 kertaa nopeammin kuin kalliolla. Kuten aiemmin on jo mainittu, tarjoaa multamaa erittäin suotuisat olosuhteet lahon menestymiseen. Muissa maaperissä pylväät lahosivat noin 1,18–1,26 kertaa nopeammin kuin kalliolla.

Merkittävää tuloksissa on eroavaisuudet saman maaperän omaavilla perustustavoilla. Esimerkiksi maaperässä hieno hiekka, kalliopylväs metsämaan lahoamisnopeus on noin 1,15 ja maapylväs pellon 1,62. Eroa voidaan pitää hyvin merkittävänä pylvään käyttöiän pituuden kannalta.

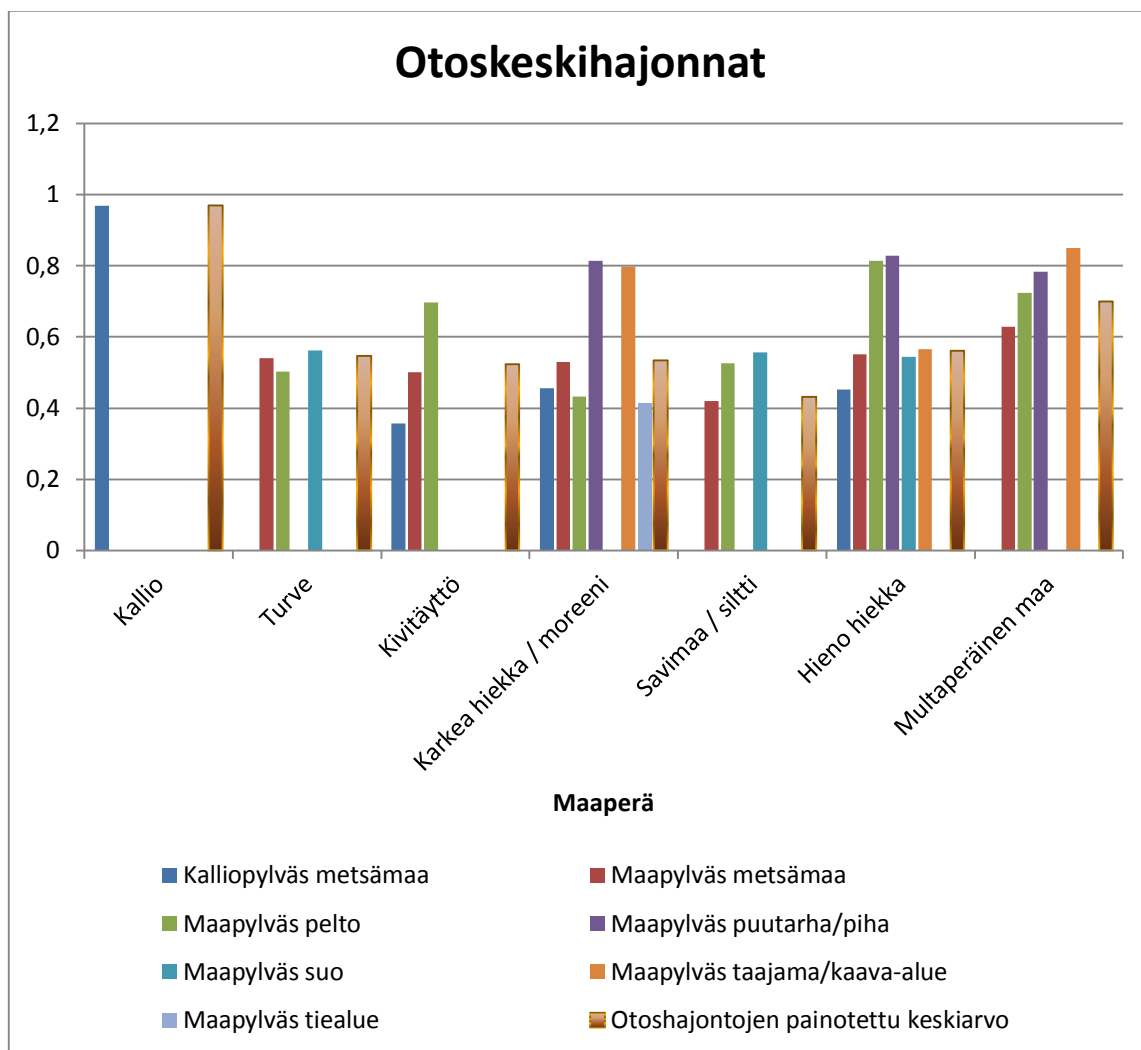
Lisäksi tuloksista nähdään, että perustustavoista puutarha / piha, pelto ja taajama / kaava-alue lahoaminen on nopeampaa kuin muissa perustustavoissa. Tämä selittyy ainakin osittain sillä, että edellä mainitut perustustavat tarjoavat lahoamiselle suotuisimmat olosuhteet.

Kuvasta 29 nähdään myös, että maaperässä turve ei perustustavoissa ole eroja. Tämä ominaisuus eroaa muista maaperistä. Turpeen ominaisuudet lahon menestymiseen

pylväissä ovat niin vallitsevat, ettei perustustavalla ole väliä. Turpeessa hapen saanti on vähäistä, joten lahoaminen on hidasta perustustavasta riippumatta. Esimerkiksi muissa maaperissä nopeasti lahoava maapylväs pelto ei turpeessa eroa muista perustustavoista.

Perustustavoista johtuvia lahonopeuden eroavaisuuksia voidaan siis pitää merkittävänä löytönä tutkimuksen kannalta, sillä aiemmin on lähinnä kirjallisuuden mukaan keskitytty vertailemaan maaperiä. Löydös osoittaa, että maaperän sisällä tapahtuvat muutokset lahoamisnopeuksissa kannattaa ottaa huomioon kunnonvalvonnassa sekä verkkolinjojen uusimisessa, tai kokonaan uusia linjoja suunniteltaessa. Kun pylväiden maaperät ja perustustavat tiedetään, voidaan lahoisuustarkastusresursseja kohdistaa tarkemmin nopeimmin lahoaville pylväille.

Kuvassa 30 on suhteellisten lahoamisnopeuksien otoskeskihajonnat. Itse keskihajonnoista on vaikeaa tehdä johtopäätöstä arvojen vaihtelun suhteen, mutta kallion tapauksessa lähes itse keskiarvon suuruinen hajonta selittyy sillä, että otoskoko on vain 26 kpl. Hajontoja voitaneen kuitenkin pitää isohkoina. Tämä johtuu siitä, että lahoamiseen vaikuttavat hyvin monet eri tekijät. Tarkat luvut suhteellisista lahoamisnopeuksista ja otoskeskihajonnoista esitellään liitteissä B.



Kuva 30: Aineiston perusteella lasketut suhteelliset otoskeskihajonnat maaperien perustustapojen mukaan.

6.2 Rappeutumiskäyrät

Rappeutumiskäyriä piirrettäessä lähdetään siitä oletuksesta, että käyrä noudattaa lähes eksponentiaalista muotoa. Tämä oletus tehtiin verkostosuosituksen perusteella (ks. kuva 15). Lisäksi käytetään hyödyksi karkeahiekka / moreeni maapylväs metsämaan otosta, sillä sen kaltaisia puupylväitä on aineistossa eniten.

Rappeutumiskäyrät tehdään annetun aineiston perusteella kaikkien maaperien mukaan, sekä maaperien eri perustuksien mukaan, sillä suhteellisia lahoamisnopeuksia katsomalla havaittiin niissä suuria eroja. Lopuksi piirretään vielä keskimääräiset rappeutumiskäyrät, jossa arvioidaan yksittäisen pylvään rappeutumista koko pylväspopulaatiossa. Tämä tarkoittaa sitä, että rappeutumisnopeuksien keskiarvot ovat suuremmat kuin aineiston avulla lasketut, johtuen jo poistetuista huonokuntoisimmista pylväistä aineistossa olevissa ikäluokissa.

Rappeutumiskäyrät ovat vain suuntaa-antavia. Niitä tutkittaessa on syytä muistaa, että niitä muodostettaessa on jouduttu tekemään paljon oletuksia ja perusteltuja arvauksia. Aineistossa ei ollut mukana kuin käytössä olevat puupylväät, jotka oli valittu aineistoon suurimmalta osalta siksi, että ne oli istutettu 1970-luvulla. Lisäksi ei ollut mitään lähtötietoja jo poistetuista pylväistä. Esimerkiksi siitä, kuinka paljon Loiste Sähköverkko Oy:n pylväskannasta on jouduttu vuosittain uusimaan, tai muuta vastaavaa informaatiota, josta olisi voitu päätellä enemmän pylvään rappeutumisnopeudesta. Tämä vaikeutti huomattavasti rappeutumiskäyrien muodostamista.

6.2.1 Aineistosta lasketut rappeutumiskäyrät

Rappeutumiskäyrät piirretään Matlab-ohelmalla. Apuna käytetään Matlabin fit-funktioita. Ensiksi lasketaan aineistosta maaperien ja perusteiden keskimääräiset suhteelliset lahoamisnopeudet, kun karkeahiekka / moreenin maapylväs metsämaa on otettu perusarvoksi. Taulukossa 8 esitellään saadut suhteelliset lahoamisnopeudet.

Taulukko 8: Suhteelliset lahoamisnopeudet, kun perusarvoksi on valittu karkea hiekka / moreeni maapylväs metsämaa.

Maaperä	Kalliopylväs metsämaa	Maapylväs metsämaa	Maapylväs pelto	Maapylväs puutarha / piha	Maapylväs suo	Maapylväs taajama / kaava-alue	Maapylväs tiealue	Keski-arvo
Hieno hiekka	0,9233	1,0069	1,3033	1,2376	1,0010	1,1026	0	1,0141
Kallio	0,8031	0	0	0	0	0	0	0,8031
Karkea hiekka / moreeni	0,9509	1,0000	1,0504	1,1192	0	1,1913	0,9734	1,0026
Kivitäyttö	0,9253	0,9423	1,2159	0	0	0	0	0,9698
Multaperäin maa	0	1,0987	1,2524	1,4126	0	1,2215	0	1,1939
Savimaa / siltti	0	1,0106	1,1968	0	0,9524	0	0	1,0115
Turve	0	0,9501	0,9359	0	0,9516	0	0	0,9505

Tämän jälkeen etsitään yleisimmät iät maaperän karkea hiekka / moreeni maapylväs metsämaalle lahoisuuden ollessa 10 ja 20 millimetriä. Iäksi aineiston perusteella saadaan 39 ja 43 vuotta. Muiden ympäristötekijöiden iät kyseisille lahoille saadaan jakamalla iät 39 ja 43 taulukon 8 lahoamisnopeuksilla. Taulukossa 9 on esitetty lasketut iät maaperien ja perustuksien mukaan.

Taulukko 9: Maaperien ja perustustapojen keskiarvot lahoisuuksien mukaan.

Maaperä	Kalliopylväs metsämaa	Maapylväs metsämaa	Maapylväs pelto	Maapylväs puutarha / piha	Maa- pylväs suo	Maapylväs taajama / kaava-alue	Maapylväs tiealue	Keski- arvo	Lahoi- suus
Hieno hiekkä	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	42,24	38,73	29,92	31,51	38,96	35,37		38,46	10,00
	46,57	42,70	32,99	34,74	42,96	39,00		42,40	20,00
Kallio	0							0	0
	48,69							48,69	10,00
	53,68							53,68	20,00
Karkea hiekkä / moreeni	0	0	0	0		0	0	0	0
	41,01	39,00	37,13	34,85		32,74	40,07	38,90	10,00
	45,22	43,00	40,94	38,42		36,09	44,18	42,89	20,00
Kivitäyttö	0	0	0					0	0
	42,15	41,39	32,07					40,21	10,00
	46,47	45,63	35,36					44,34	20,00
Multape- räinen maa		0	0	0		0		0	0
		35,50	31,14	27,61		31,93		32,67	10,00
		39,14	34,33	30,44		35,20		36,02	20,00
Savimaa / siltti		0	0		0			0	0
		38,59	32,59		40,95			38,56	10,00
		42,55	35,93		45,15			42,51	20,00
Turve		0	0		0			0	0
		41,05	41,67		40,98			41,03	10,00
		45,26	45,94		45,19			45,24	20,00

Kun lahoisuudet iän perusteella ovat kolmessa pisteessä tiedossa, voidaan rappeutumiskäyrät muodostaa Matlabin fit-funktion avulla. Oletuksena on, että käyrien muodot on määrätty ennalta noudattamaan eksponentiaalista funktiota iän suhteen nolasta neljäänkymmeneen millimetriin. Samaan kuvaan on piirretty myös lineaarinen suora katkoviivoin iän funktiona kymmenestä neljäänkymmeneen millimetriin (mm).

Lineaarinen suora on piirretty kuvaan sen vuoksi, että eksponentiaalinen kasvu saattaa antaa liioitellun käsityksen lahonopeuden kiihtymisestä. Lineaarisen suoran avulla voidaan arvioida lahoamista 10 millimetrin jälkeen, jos lahoaminen on eksponentiaalista nopeutta hitaampaa.

Kuvassa 31 on esitetty rappeutumisnopeudet maaperien mukaan. Kuvasta nähdään, että lineaariset käyrät (katkoviivat) ja eksponentiaaliset käyrät eroavat merkittävästi toisistaan, kun pylväs saavuttaa 40 mm lahoisuuden. Todennäköisesti todellisuutta vastaava ikä 40 mm lahoisuudelle on eksponenttikäyrän ja lineaarisen käyrän välissä.

Matlabilla voidaan myös tulostaa käyrien funktiot ja niiden arvot. Rappeutumiskäyrät ovat muotoa:

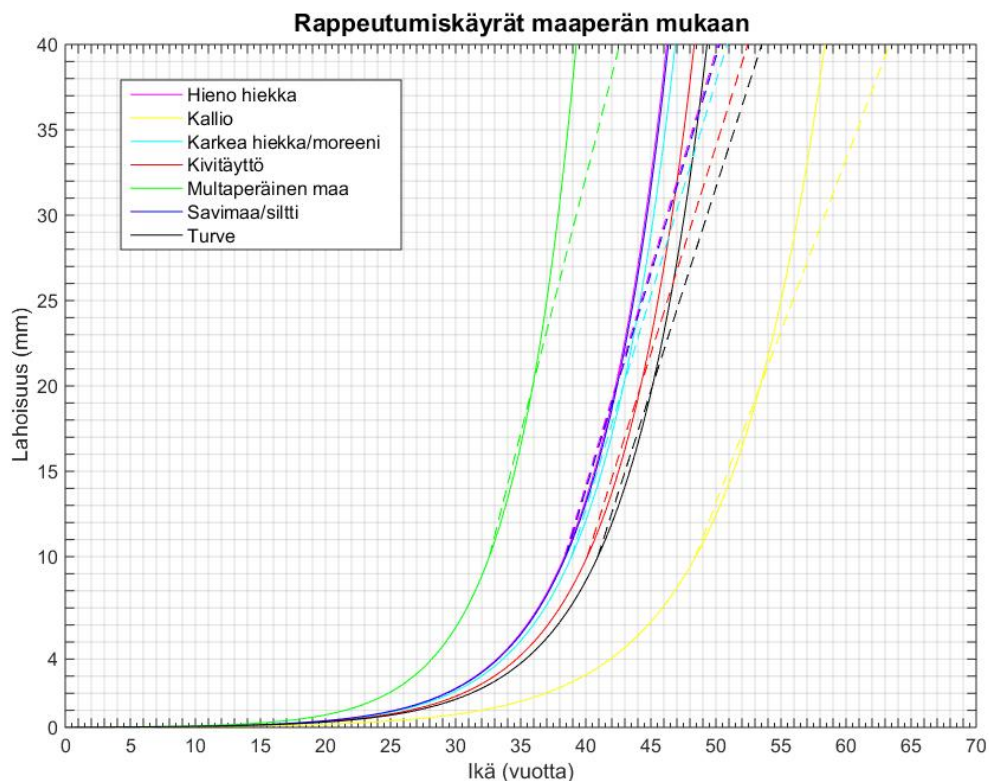
$$f(x) = ae^{bx} \quad (5)$$

$$f(x) = ax - b, f(x) \geq 10 \quad (6)$$

,joissa a ja b ovat vakioita ja x on pylvään ikä. Funktiot saavat arvokseen lahoisuuden ajan hetkellä x.

Rappeutumiskäyrien vakiot a ja b löytyvät liitteestä C. Kaavan 5 vakiot löytyvät liitteestä C.1 ja kaavan 6 vakiot liitteestä C.2. Vakioita käyttämällä saadaan tarkka lahon määrä, kun ikä tiedetään.

Kuvassa 31 on esitetty rappeutumiskäyrät eri maaperille. Kaavan 5 mukaiset käyrät on esitetty yhtenäisillä viivoilla ja kaavan 6 käyrät on esitetty katkoviivoilla. Lineaarisen ja eksponentiaalisen esitystavan välillä on suuria eroja tultaessa ikään, jolloin pylväs tulisi uusia. Lisäksi maaperien väliset erot ovat merkittävät.

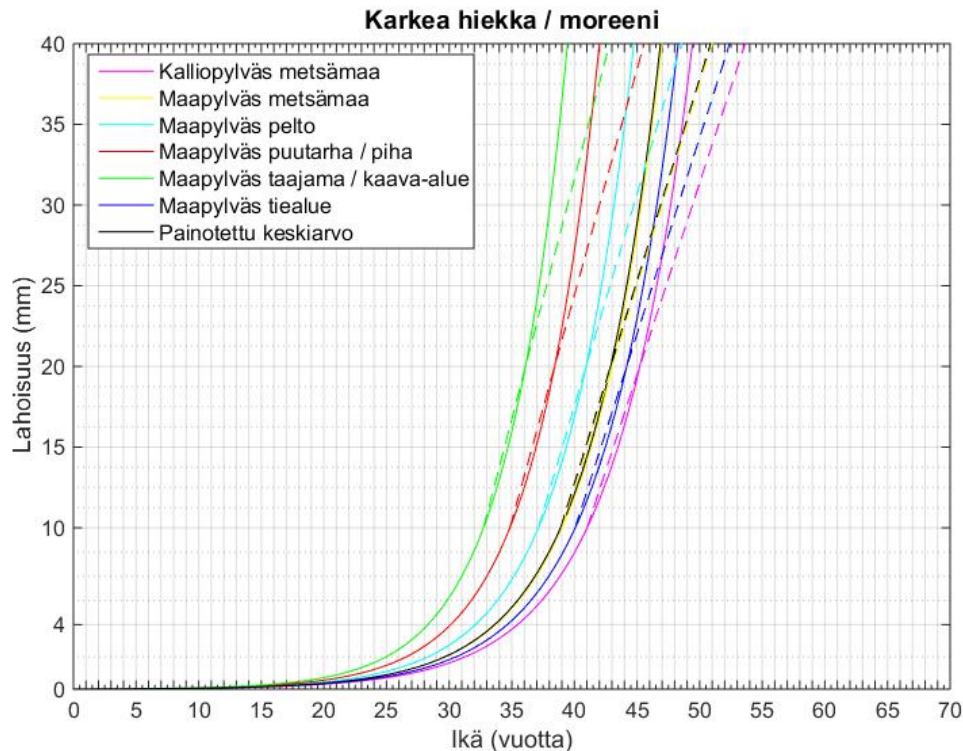


Kuva 31: Rappeutumiskäyrät jokaiselle maaperälle.

Rappeutumiskäyrät perustustavasta riippuen piirretään samalla tavalla kuin edellä kuvatut maaperien rappeutumiskäyrät. Käyrissä on maaperien sisällä paljonkin eroa. Esimerkiksi kuvassa 32 on piirretty karkea hiekka / moreenin rappeutumiskäyrät eri perusteiden mukaan. Kuvasta nähdään, että maapylväs pelto, puutarha / piha ja taajama /

kaava-alue – perustat lahoavat nopeimmin. Kun lahoaminen on saavuttanut 40 mm, on kalliopylväs metsämaalla ja maapylväs taajama / kaava-alueella ikäeroa noin 10 vuotta.

Liitteessä D on esitetty kaikki muut maaperien rappeutumiskäyrät perustustapojen mukaan, lukuun ottamatta kalliota, koska sillä on vain yksi käyrä, joka on kuvattu jo maaperien yhteisessä kuvassa 31.



Kuva 32: Karkea hiekka / moreenin rappeutumiskäyrät eri perustustapojen mukaan.

6.2.2 Rappeutumiskäyrät koko populaatiolle

Edellisessä alaluvussa rappeutumiskäyriin ei yritetty sovittaa koko pylväspopulaation keskiarvoista rappeutumista. Tällä tarkoitetaan sitä, että oletettiin aineiston olevan lahonopeudeltaan normaalijakautunutta, vaikka näin ei käytännössä ole. Huonokuntoisimmat pylväät on pyritty poistamaan viimeistään lahon saavuttaessa 40 mm. Näin jäljelle jäävät vain hyväkuntoisimmat pylväät, jolloin otoksien lahoamisnopeus pienenee. Tuloksina saadaan siis hitaampaa lahoamista kuin se todellisuudessa olisi.

Tässä tutkimuksessa on siis tehty oletus, että osa aineiston ikäisistä pylväistä on jo korvattu uusilla. Haasteena tutkimuksen kannalta on se, ettei etukäteen ole tiedossa paljonko aineiston ikäisistä pylväistä on jo poistettu. Samalla ei tiedetä, minkä ikäisenä nämä pylväät on korvattu uusilla.

Ongelma on ratkaistu aloittamalla ikääntymisen tarkastelu 40 millimetristä ja etenemällä kohti 0 millimetriä. Lisäksi mallia yksinkertaistettiin niin, että perustustapojen vaikutuksiin ei ole kiinnitetty huomiota. Rappeutumiskäyrät kuvaavat siis vain keskimääräistä lahoamisnopeutta kyseisille maaperille. Lisäksi kaikki yli 40 mm

lahoisuuksien pylväät on suodatettu pois tarkastelusta. Tällöin maaperien vertailu toisiinsa tasavertaistuu. Tutkimuksessa laskettiin ikien keskiarvot seuraaville lahoisuuksille: 4mm, 20mm ja 40mm. Nämä lahoisuudet ovat lahoasteikon raja-arvoja. Yhdistämällä kyseiset lahoisuudet ja niiden ikäkeskiarvot yhteen kaartuvilla käyrillä saatiin rappeutumiskäyrä.

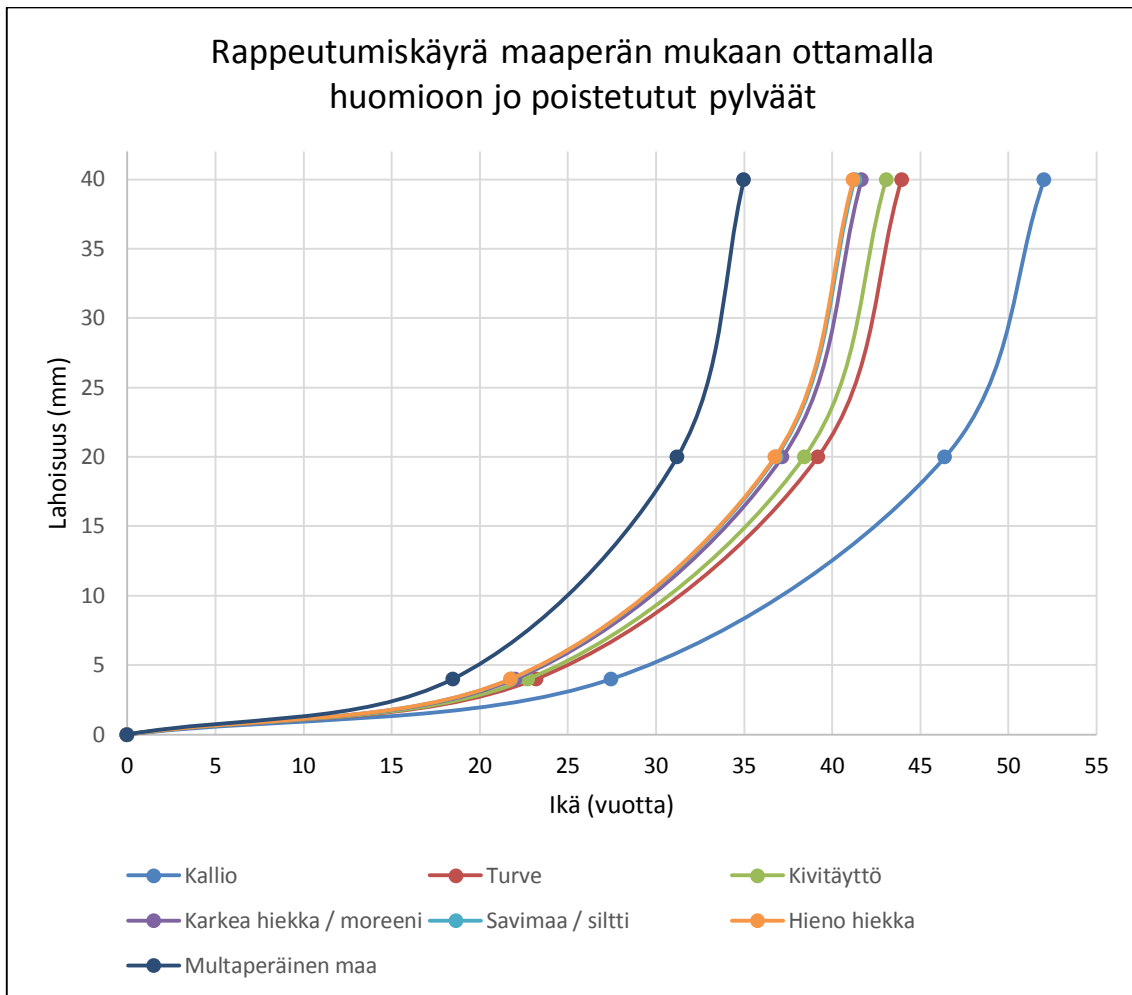
Tarkastelun kohteeksi valittiin karkea hiekka / moreeni maapylväs metsämaa, koska siihen kuuluvia pylväitä on eniten aineistossa. Ensimmäiseksi katsottiin 40 mm lahoisuudelle iän keskiarvo. Tämä oli 41,54 vuotta. Seuraavaksi tutkittiin 20 mm lahoisuutta poistamalla ensin kaikki 40 mm sisältäneet iät pois, jolloin iän keskiarvoksi saatiin 37,1 vuotta. Neljän millimetrin lahoisuudelle saatiin ikä katsomalla pienintä mahdollista ikää, joka kyseisestä maaperästä löytyi. Iäksi löydettiin 22 vuotta.

Seuraavaksi verrattiin pelkkien maaperien suhteellisia lahoamisnopeuksia karkea hiekka / moreeni maapylväs metsämaan lahoamisnopeuteen. Kun erot olivat tiedossa, voitiin myös maaperille laskea iät kyseisille lahoisuuksille käyttäen karkea hiekka / moreeni maapylväs metsämaan tuloksia. Taulukossa 10 esitetään kaikkien maaperien lasketut iät kyseisissä lahoisuuksissa.

Taulukko 10: Maaperien iät kolmelle eri lahoisuudelle.

Maaperille lasketut iät (vuotta) lahoisuuden (mm) mukaan							
Kallio	Turve	Kivitäyttö	Karkea hiekka / moreeni	Savimaa / siltti	Hieno hiekka	Multaperäinen maa	Lahoisuus (mm)
27,47	23,21	22,74	21,93	21,81	21,75	18,48	4,00
46,40	39,20	38,42	37,16	36,83	36,74	31,21	20,00
52,02	43,95	43,08	41,67	41,30	41,19	34,99	40,00

Taulukon 10 arvojen perusteella voidaan piirtää rappeutumiskäyrät. Käyrät on esitetty kuvassa 33. Käyristä nähdään, että lahoisuus kasvaa hitaasti 4 millimetriin saakka ja kiihdyttää vauhtia 20 millimetriin, jonka jälkeen se lisää yhä kasvunopeutta. Kuvasta nähdään myös, että kallio ja multamaa erottuvat selvästi muista pylväistä. Muut maaperät ovat lähellä toisiaan, mikä ei ehkä aikaisemman tutkimuksen ja kokemuksen perusteella pidä paikkaansa. Etenkin kivitäyttö ja turve ovat aikaisemman tiedon perusteella lähempänä kalliota.



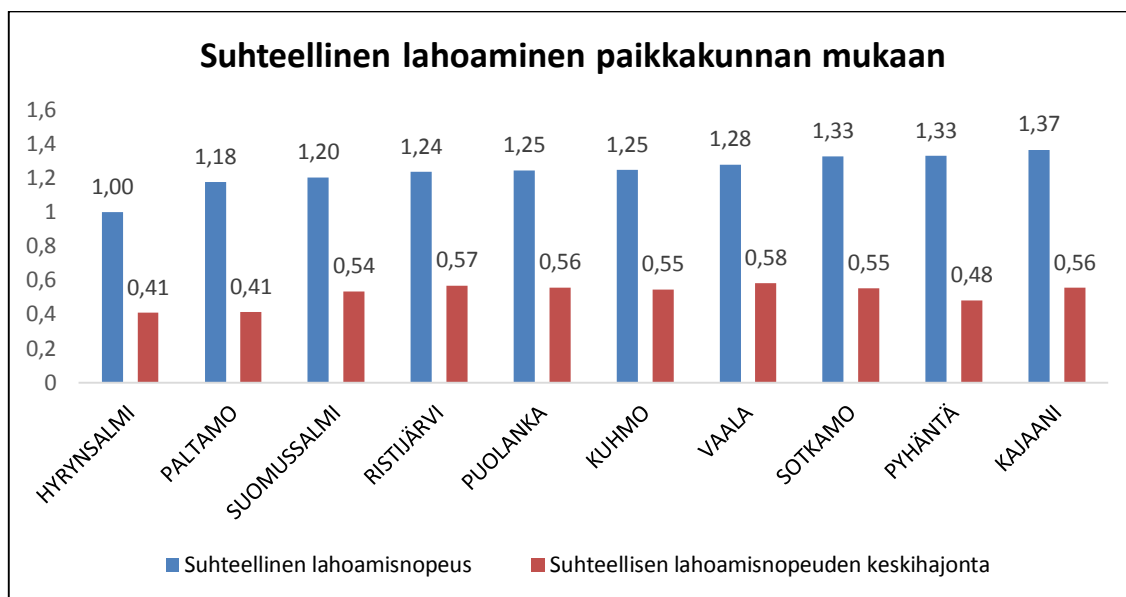
Kuva 33: Arvio pylväiden rappeutumisesta maaperien mukaan, kun koko populaatio otetaan huomioon.

Vertaamalla kuvaa 33 kuvaan 31 nähdään, että kuvan 33 pylväät ikääntyvät muutaman vuoden aikaisemmin kuin kuvan 31 pylväät. Kuva 33 on kuitenkin hyvin karkea arvio kuinka pylväs lahoaa, kun otetaan huomioon jo poistetut huonokuntoisimmat pylväät. Siitä syystä kyseisiä rappeutumiskäyriä on syytä käyttää hyvin harkiten. Käyrät lähinnä antavat arvion siitä kuinka koko pylväspopulaatio keskimääräisesti rappeutuu.

6.3 Paikkakunnan vaikutus lahoamiseen

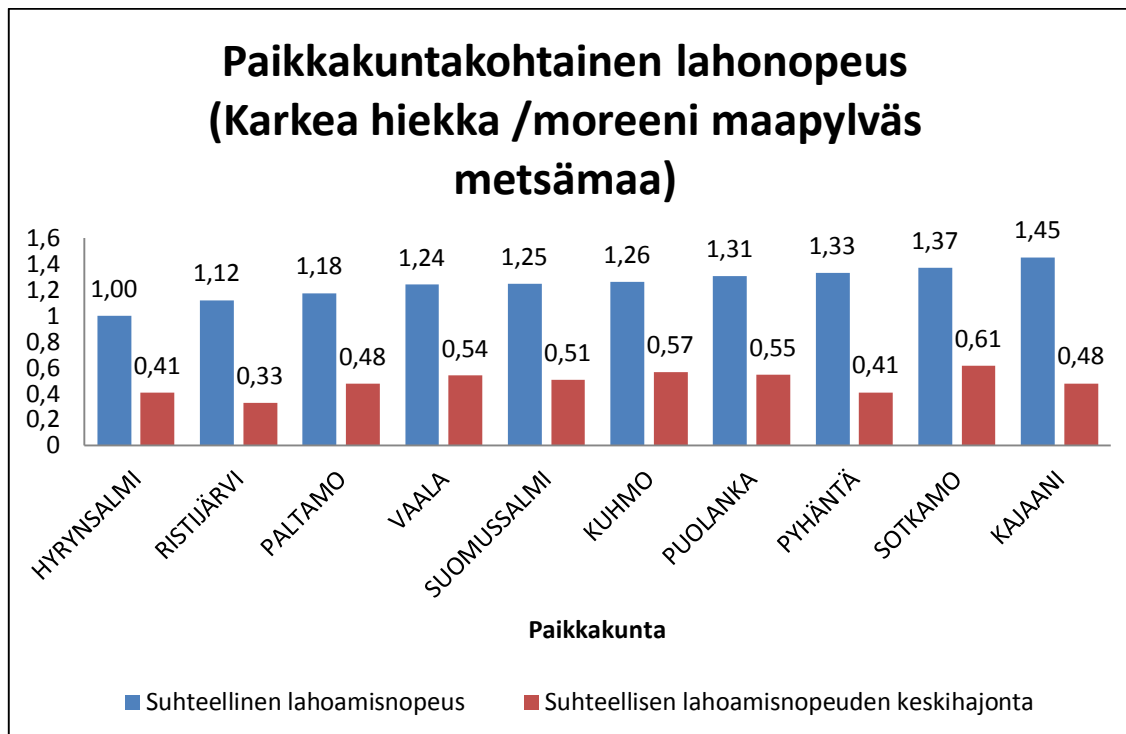
Tässä alaluvussa esitetään paikkakuntakohtaiset suhteelliset lahoamisnopeudet. Ensimmäisenä tarkastellaan ottamalla kaikki pylväät huomioon, eli ei tarkastella mitään yksittäistä maaperää ja perustustapaa. Seuraavaksi tarkastellaan suhteellista lahoamisnopeutta yksityiskohtaisemmin ottamalla huomioon vain yleisin maaperä karkea hiekka / moreeni ja perustustapa maapylväs metsämaa.

Kuvassa 34 esitetään paikkakuntakohtaiset suhteelliset lahoamisnopeudet ottamalla koko aineiston pylväät huomioon. Kuvasta nähdään, että erot nopeimmin lahoavien ja hitaimmin lahoavien pylväiden välillä ovat suuria. Näitä tuloksia ei kuitenkaan voida pitää täysin luotettavina, sillä maaperä ja perustustapa voivat erota paikkakuntakohtaisesti. Näin ne voivat vääristää tulosta.



Kuva 34: Paikkakuntakohtaiset suhteelliset lahoamisnopeudet aineiston kaikki pylväät mukaan otettuna.

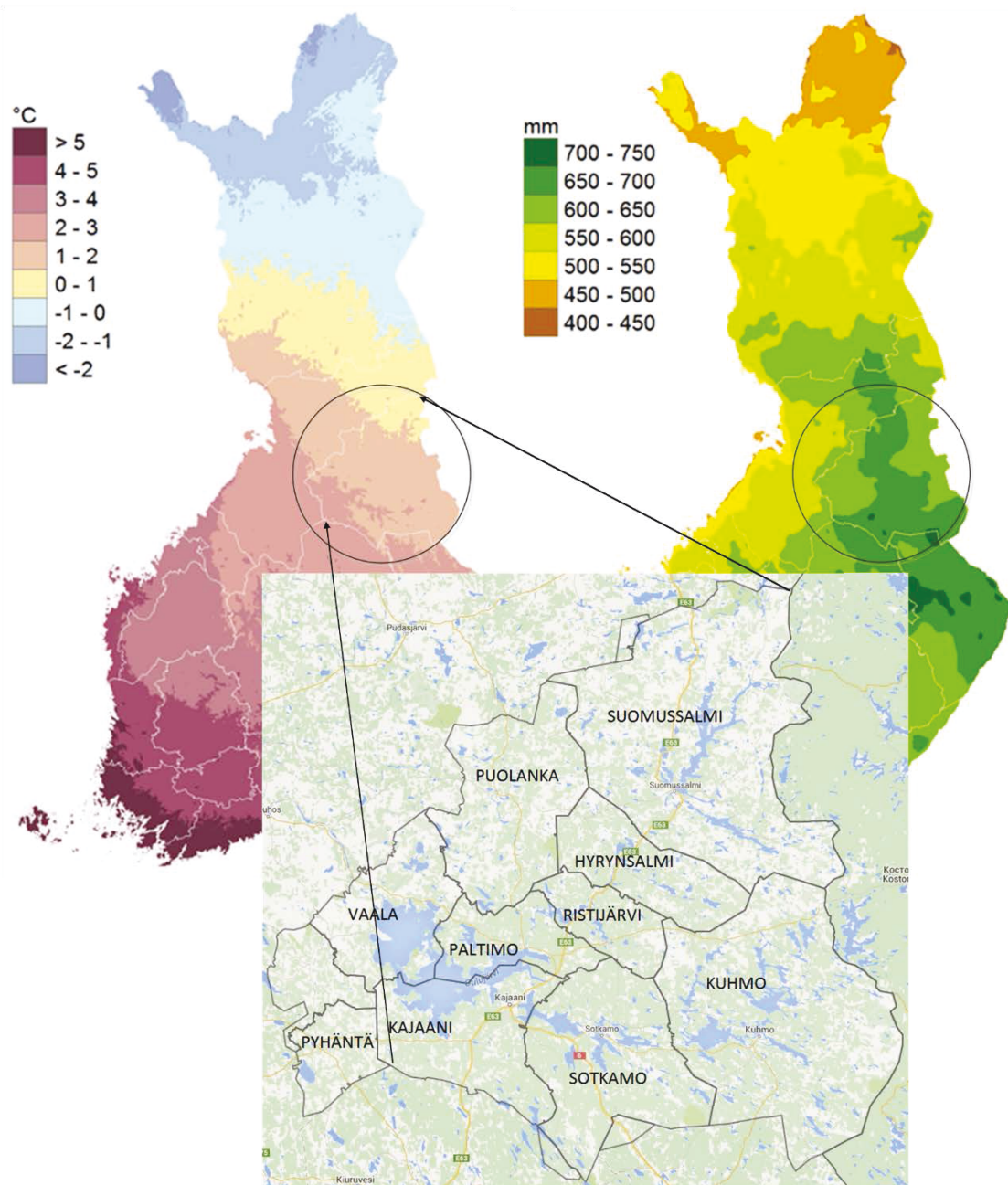
Tutkimusta tarkennetaan koskemaan vain yhtä maaperään ja perustustapaa. Kuvassa 35 esitetään paikkakuntakohtaiset suhteelliset lahoamisnopeudet, kun maaperäksi on valittu karkea hiekka / moreeni ja perustustavaksi maapylväs metsämaa. Kuvasta nähdään, että tulokset ovat kuvan 34 kanssa samansuuntaiset. Kajaani, Sotkamo ja Pyhäntä ovat nopeimmin lahoavat paikkakunnat, kun taas Hyrynsalmi erottuu muista kunnista selvästi hitaimmin lahoavaksi.



Kuva 35: Paikkakuntakohtaiset suhteelliset lahonopeudet karkea hiekka / moreeni maapylväs metsämaan mukaan.

Erot paikkakuntien välillä voidaan ainakin osittain perustella niiden ilmastoilla. Kuvassa 36 esitetään Suomen keskilämpötila- ja sademääräkartat, sekä Loiste Sähköverkko Oy:n

sähkönjakelualueet, jotka ovat samat kuin tutkimuksen paikkakunnat. Kuvasta nähdään, että Kajaanin seutu osuu sähkönjakelualueen lämpimimmälle ja sateisimmalle alueelle, Pyhantä lämpimimmälle alueelle ja Sotkamo sateisimmalle alueelle. Kuten aikaisemmin on todettu, lahoamiseen vaikuttavat sekä lämpötila että suhteellinen kosteus. Edellä mainituilla paikkakunnilla sijaitsevilla pylväillä on siis paremmat olosuhteet lahoamiselle kuin muilla paikkakunnilla. Kajaanin seudulla myös vesistöjen suuri määrä saattaa nostaa suhteellista kosteutta. Näin ollen paikkakuntien suhteellisten lahoamisnopeuksien eroavuuksia voidaan perustella ilmaston erilaisuudella.



Kuva 36: Suomen vuoden keskiarvolämpötila- ja sademääräkartat 1981–2010 sekä Loiste Sähköverkko Oy:n sähkönjakelualueet. [57, 58]

Paikkakuntien tulokset ovat kuitenkin vain suuntaa antavia, ja niiden erojen tulkinta ilmaston erilaisuudella vaatii tarkempaa tutkimusta. Esimerkiksi tarkemmat ilmaston historialliset havaintotiedot saattaisivat selittää tuloksia paremmin.

Paikkakohtainen tutkimus on myös mahdollista pilkkoa maantieteellisesti vielä pienempiin osiin, sillä aineisto käsittää jokaisen pylvään maantieteelliset koordinaatit. Näin voitaisiin etsiä samankaltaisuuksia ja eroavaisuuksia koordinaattien avulla.

6.4 Luotettavuusanalyysi

Tässä diplomityössä on aikaisemmin kerrottu lahoisuustarkastuksiin liittyvistä mahdollisista inhimillisistä mittausvirheistä. Tulosten luotettavuuden kannalta mainitun virheen olemassaolo kannattaa pitää mielessä. Tässä tutkimuksessa on vain tyydytty ottamaan huomioon sen mahdollinen olemassaolo ja sietämään, että se voi vääristää hieman tuloksia. Sen sijaan maaperien suhteellisten lahoamisnopeuksien eroavaisuuksien tilastollista luotettavuutta voidaan testata luotettavuusanalyysillä.

Luotettavuusanalyysi tehdään SPSS-ohjelmalla Kruskal-Wallis testillä. Sen avulla voidaan vertailla, onko joillakin vertailtavilla otoksilla tilastollisesti merkitsevää eroa toisiinsa nähden. Kruskal-Wallis testillä voidaan testata riippumattomien otosten välisen eron merkitsevyyttä, etenkin jos otoskoot ovat pieniä. [59] Testi sopii tähän tutkimukseen hyvin, koska joidenkin maaperien ja perustapojen pylväiden otoskoot olivat pienet. Tämän lisäksi ei testissä tarvitse olettaa otoksien olevan normaalijakautuneita [59].

Testin p-arvoksi valittiin 0,05. Tämä arvo on valittu siksi, että sitä käytetään yleisesti tilastollisissa testeissä [59]. Seuraavaksi määriteltiin hypoteesit:

- Nollahypoteesi: maaperien lahoamisnopeus / ikä -jakaumilla ei ole tilastollisesti merkitsevää eroa.
- Vaihtoehtoinen hypoteesi: maaperien lahoamisnopeus / ikä -jakaumilla on tilastollisesti merkitsevää eroa.

Tämä tarkoittaa sitä, että nollahypoteesi hylätään, jos testistä saatu p-arvo on pienempi kuin 0,05. Taulukossa 11 esitetään testin tulostus. Se kertoo, että ainakin joidenkin maaperien välillä on tilastollisesti merkitsevää eroa lahoamisnopeus / ikä -jakaumissa.

Taulukko 11: SPSS-ohjelman tulostus Kruskal-Wallis testillä. Tulostus kertoo että nollahypoteesi hylätään.

Hypothesis Test Summary				
	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Lahonopeus/Ika is the same across categories of Maapera.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	,000	Reject the null hypothesis.

Asymptotic significances are displayed. The significance level is ,05.

Seuraavaksi luotettavuusanalyysia tarkennetaan tutkimalla jakaumien eroavaisuuksia ryhmittäin. Taulukossa 12 on tulostus maaperien parivertailusta. Siitä nähdään, että suurimmaksi osaksi maaperät eroavat toisistaan lahoamisnopeus / ikä -jakauman suhteen.

Mielenkiintoista on se että, vaikka kallio erosi kivitäytöstä ja turpeesta suuresti suhteellisen lahoamisnopeuden keskiarvon suhteen, ei jakaumissa näyttäisi tuloksen perusteella olevan merkitsevästi eroa. Tämä kertoo aikaisemman kokemuksen ja tutkimuksen valossa sen, että kivitäyttö ja turve ovat lähempänä kallion lahoamisnopeuden arvoa, tai vastaavasti kallio on lähempänä kivitäytön ja turpeen arvoja.

Tuloksista näkyy myös se, ettei savimaa / siltin ja hieno hiekan välillä näyttäisi olevan tilastollisesti merkitsevää eroa. Tämä on puolestaan ristiriidassa aikaisempaan tietoon. Toisaalta maaperien lahonopeuden samankaltaisuus nähtiin myös suhteellisia lahoamisnopeuksia vertailemalla. Savimaassa lahoamisen täytyisi olla hitaampaa kuin hieno hiekassa lahoaminen. Mittauksissa määritelty savimaa / siltti, etenkin siltin puolesta, voi olla lähellä rakenteeltaan hienojakoista hiekkaa, joten se voi selittää ainakin osittain jakaumien samankaltaisuuden.

Taulukko 12: SPSS-ohjelman tulostus Kruskal-Wallis testillä.

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
Karkea hiekka / moreeni-Hieno hiekka	344,107	71,130	4,838	,000	,000
Kivitäyttö-Hieno hiekka	763,912	157,141	4,861	,000	,000
Hieno hiekka-Multaperäinen maa	-465,339	109,935	-4,233	,000	,000
Kallio-Multaperäinen maa	-2 333,360	500,354	-4,663	,000	,000
Karkea hiekka / moreeni-Multaperäinen maa	-809,446	103,724	-7,804	,000	,000
Turve-Hieno hiekka	616,019	85,079	7,241	,000	,000
Kivitäyttö-Multaperäinen maa	-1 229,252	174,334	-7,051	,000	,000
Kivitäyttö-Savimaa / siltti	-823,129	170,562	-4,826	,000	,000
Turve-Multaperäinen maa	1 081,359	113,743	9,507	,000	,000
Turve-Savimaa / siltti	675,236	107,872	6,260	,000	,000
Karkea hiekka / moreeni-Savimaa / siltti	-403,323	97,250	-4,147	,000	,001
Kallio-Savimaa / siltti	-1 927,238	499,052	-3,862	,000	,002
Kallio-Hieno hiekka	1 868,021	494,626	3,777	,000	,003
Turve-Karkea hiekka / moreeni	271,913	76,885	3,537	,000	,009
Savimaa / siltti-Multaperäinen maa	406,123	128,389	3,163	,002	,033
Kallio-Karkea hiekka / moreeni	-1 523,914	493,282	-3,089	,002	,042
Kivitäyttö-Karkea hiekka / moreeni	419,806	152,860	2,746	,006	,127
Kallio-Turve	-1 252,002	495,486	-2,527	,012	,242
Kallio-Kivitäyttö	-1 104,109	512,798	-2,153	,031	,658
Hieno hiekka-Savimaa / siltti	-59,216	103,849	-,570	,569	1,000
Kivitäyttö-Turve	-147,893	159,828	-,925	,355	1,000

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same. Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is ,05.

Luotettavuusanalyysin yhteenvedona voitaneen todeta, että ainakin maaperien suhteelliset lahoamisnopeudet ja niiden erot ovat tilastollisesti luotettavia. Näin ollen tuloksia voidaan käyttää laajemmassakin merkityksessä. Esimerkiksi niitä voidaan käyttää harkiten osana sähkönjakeluhyhtiön päätöksentekoa.

7 Johtopäätökset

Luvun 6 alussa esiteltiin puupylväiden lahoamisnopeudet ja rappeutumiskäyrät eri ympäristöissä. Lopussa taas paneuduttiin tulosten luotettavuuteen, eli voidaanko tuloksia luotettavasti käyttää koko pylväspopulaation tarkasteluun. Tässä luvussa jatketaan luvun 6 tarkastelua laajemmasta näkökulmasta ja arvioidaan tulosten merkityksellisyyttä.

Maaperät, perustustavat ja paikkakunnat voidaan laittaa suuruusjärjestykseen lahoamisnopeuksiltaan. Näin voidaan kohdentaa lahoisuustarkastuksen resursseja tarkemmin ensimmäisenä lahoaville pylväille. Tarkastuksien ajankohta tarkentuu ja niiden kustannukset voivat pienentyä. Esimerkiksi pylväs, joka sijaitsee multaperäisessä maassa puutarha / piha-alueella Kajaanin seudulla, voi saavuttaa käyttöikänsä lopun todella nopeasti verrattuna muihin ympäristöihin.

Lisäksi keskeytyskustannusten ja lahoamista nopeuttavien ympäristötekijöiden kannalta keskeiset pylväät voidaan merkitä erikoistarkastusten kohteeksi. Kun tiedetään pylväiden tarkka kunto, voidaan ehkäistä suurimmat pylvään katkeamisesta johtuvat keskeytyskustannukset. Tämä ei tietenkään poista linjaston muita kunnossapitotoimia, esimerkiksi sähkölinjaston raivausta.

Tulevaisuuden sähkönjakeluverkkojen suunnittelua voidaan myös tehostaa, kun tiedetään missä ja milloin pylväät ovat käyttöikänsä päässä, ja millaiseen maaperään mahdollisesti uudet pylväät tulisi pystyttää. Esimerkiksi nykyiset kuparikyllästeiset pylväät voivat lahota hyvinkin nopeasti laholle suotuisassa maaperässä. Tällöin kannattaa harkita esimerkiksi maakaapelointia tai teräspylvästä, koska kustannukset saattavat hyvinkin nopeasti nousta kuparipylväitä käytettäessä. Toisaalta, jos vain suunnittelun ja kustannusten kannalta on mahdollista, voitaisiin uudet linjat vetää laholle vähemmän suotuisampien maaperien kautta.

Tulosten ja luotettavuusanalyysin avulla voidaan maaperät jakaa lahoamisnopeuksiltaan 4 eri luokkaan, jotka ovat

1. multaperäinen maa
2. savimaa / siltti, hieno hiekka
3. karkea hiekka / moreeni
4. turve, kivitäyttö ja kallio,

jossa luokkaan 1 kuuluva maaperä lahoaa nopeimmin ja luokkaan 4 kuuluvat maaperät hitaimmin. Luokat 2 ja 3 ovat hyvin lähellä toisiaan lahoamisnopeuksiltaan. Tulokset ovat aikaisemman kokemuksen ja tutkimuksen kanssa samansuuntaiset. Pieniä eroavaisuuksia on, esimerkiksi savimaa / siltti ja hieno hiekka eivät näyttäisi tämän tutkimuksen kannalta eroavan suuresti. Aikaisemman tutkimuksen ja kokemuksen valossa hiekkamaassa lahoaminen on nopeampaa kuin savimaassa. Kuitenkin suurempia johtopäätöksiä tämän eroavaisuuden suhteen olisi tehtävä vasta kun tiedettäisiin tarkasti ovatko nyt tutkitut maaperät ja aikaisemmin tutkitut maaperät koostumukseltaan samanlaiset. Sen sijaan kallion, turpeen ja multaperäisen maan tulokset ovat aikaisemman tiedon kanssa yhtenäiset.

Tämän diplomityön kannalta tärkeimpänä uutena tietona voidaan pitää perustustavoista johtuvia eroavaisuuksia lahoamisessa maaperän ollessa sama. Perustustavoista johtuvat lahoamisnopeuksien vaihtelut olivat suurimmat nopeimmin lahoavissa maaperissä. Tulos on ymmärrettävä sillä nopeammin lahoavien pylväiden maaperissä perustustavat usein korreloivat laholle suotuisten olosuhteiden kanssa. Esimerkiksi perustustapa maapylväs pelto oli lahoamisnopeudeltaan monessa maaperässä huomattavasti maaperän painotettua keskiarvoa nopeampi. Näiden tuloksien mukaan puupylväiden kunnossapidosta vastaavan on siis syytä ottaa myös perustustavat huomioon pylväiden ikääntymistä tarkkailtaessa.

Paikkakuntakohtaisilla lahoamisnopeuksilla oli myös eroavaisuuksia. Vaikka tulokset olikin saatu tarkasteltaessa vain yhtä maaperää ja perustustapaa, on paikkakuntakohtainen jako hyvin karkea. Paikkakunnat ovat pinta-alaltaan suuria, joten ilmastolliset vaihtelut paikkakuntien sisälläkin voivat olla suuria. Tarkemmilla ilmastotiedoilla voitaisiin jaotella paikkakunnat vielä pienempiin osiin, jolloin myös paikkakuntakohtainen tutkimus tarkentuisi. Tämän tutkimuksen avulla voidaan kuitenkin päätöksen tekijän kokemusta ja harkintaa käyttäen ottaa paikkakunnat huomioon pylväiden kuntoon liittyvissä päätöksissä.

Rappeutumiskäyriä piirrettäessä tehtiin monia oletuksia, esimerkiksi käyrän muodon suhteen. Siksi näihin tuloksiin on syytä suhtautua varauksella. Rappeutumiskäyriä onkin syytä käyttää harkiten osana kunnossapidon suunnittelua. Ne kuitenkin voivat antaa kohtalaista tietoa pylväiden käyttöikien elinkaarista eri maaperillä ja perustustavoilla. Käyristä voidaan myös päätellä, että pylvään käyttöiässä on suuria eroja maaperien kesken sekä maaperän sisällä perustustavasta johtuen. Siksi perustustapa onkin syytä ottaa suunnittelussa huomioon, kuten edellä jo mainittiin.

Lahoaminen on monen tekijän summa, ja voimakkaasti paikallisista tekijöistä riippuvainen. Siksi tämän tutkimuksen tuloksia ei voida sinänsä käyttää hyväksi muualla kuin Kainuun alueella. Voidaan kuitenkin olettaa, että ainakin samankaltaisissa vallitsevissa olosuhteissa maaperästä ja perustustavoista johtuvat eroavaisuudet pylvään lahoamisessa ovat samansuuntaisia myös muualla Suomessa. Lisäksi tämän tutkimuksen menetelmiä voidaan käyttää myös muualla ja eri aineistoilla.

8 Yhteenveto

Tässä diplomityössä tutkittiin sähköjakuverkon puupylväiden lahoamista eri ympäristöissä. Puupylväiden lahoamiseen vaikuttavat hyvin monet eri tekijät. Tärkeimpinä niistä voidaan pitää maaperän happipitoisuutta, kosteutta, lämpöä sekä ravinteita. Etenkin jos happea on liian vähän, kosteutta liian vähän tai liian paljon, tai lämpötila on liian alhainen, eivät lahottajasienet pysty toimimaan. Myös puulajilla ja yksittäisen puun perintötekijöillä on vaikutusta lahoamiseen.

Lahottajasienet aiheuttavat puun lahoamisen. Niitä on monta eri lajia. Puupylväiden kannalta vaarallisimmat lahottajasienet kuuluvat rusko- tai katkolahottajiin. Niitä vastaan suojaudutaan kyllästämällä puupylväät ennen käyttöönottoa. Suomessa suurin osa pylväistä on kyllästetty CCA-kyllästeellä. Toinen yleinen kylläste on kreosootti. CCA-kylläste on jo kielletty ja kreosootti tultaneen kieltämään. Kreosootin tilalla tultaneen ainakin toistaiseksi käyttämään C-kyllästettä. Tämä tutkimus on tehty vertailemalla vain CCA-kyllästettyjä pylväitä.

Pylväät lahoavat hyvin yksilöllisesti. Tämä johtuu siitä, että lahoamiseen vaikuttavat niin monet eri tekijät. CCA-kyllästeisten pylväiden käyttöikä Suomessa on noin 40–50 vuotta, mutta hajonta on hyvin suurta. Pylväät tulisi tämän vuoksi tarkastaa tietyin väliajoin. Ongelman kuitenkin aiheuttaa pylväiden erittäin suuri määrä. Kaikkien pylväiden tarkastaminen säännöllisesti ei tarkastuksen hitauden ja kustannusten vuoksi ole mahdollista. Siksi onkin tärkeää yrittää erottaa mahdollisten ympäristötekijöiden eroavaisuudet lahoamisen suhteen, jotta resursseja pystyttäisiin kohdentamaan tarkastuksissa tehokkaammin, ja välttämään pylväiden liian suuresta lahoamisesta koituvat mahdolliset kustannukset.

Lahoisuustarkastuksille on omat suositukset. Ne on kerrottu verkostosuosituksessa RJ33:09. Lahoisuustarkastus tehdään vielä nykyisinkin hyvin perinteisillä menetelmillä. Tarkastuksen tarkoituksena on saada pylvään nykyinen kunto mahdollisimman tarkasti mitattua. Tarkastuksen tärkein vaihe on nykyisen terveen tyvihalkaisijan määrittäminen. Tämän avulla voidaan päätellä, onko pylväs vielä turvallinen vai täytyykö se vaihtaa.

Koska tarkastus tehdään perinteisin menetelmin, on mittavirheen mahdollisuus suuri. Lisäksi halkaisijan mittaaminen on usein hankalaa lahon pistemäisyydestä tai sisälahosta johtuen. Virhealttius on myös syytä pitää mielessä tutkimusta tehtäessä. Tarvitaankin uusia kehittyneitä menetelmiä helpottamaan ja tarkentamaan lahoisuustarkastusta. Uusia kehittyneempiä menetelmiä ei ole kuitenkaan vielä tarjolla, jotka pystyisivät kilpailemaan käytettyjen menetelmien kanssa.

Tutkimuksen aineisto oli saatu Loiste Sähköverkko Oy:lta. Se käsitti lähes 9000 kuntotarkastettua puupylvästä, joista suurin osa oli istutettu 1970-luvulla. Aineistosta poistettiin vaillinaisia tietoja omaavat pylväät, sekä muut kuin CCA-kyllästeiset pylväät. Aineisto käsitti suuren määrän paikan päällä todettuja tietoja. Näistä tutkimuksen kohteeksi valittiin maaperä-, perustustapa- ja paikkakuntakohtaiset tiedot. Erilaisia maaperiä on aineistossa 7 kpl, perustustapoja 7 kpl ja paikkakuntia 10 kpl. Tutkimuksessa pyrittiin etsimään niiden eroja suhteellisten lahoamisnopeuksien avulla.

Suhteelliset lahoamisnopeudet saatiin jakamalla pylvään lahoisuus sen iällä. Koska maaperien ikäjakaumat erosivat toisistaan ja lahoaminen kiihtyy iän kasvaessa, jaettiin pylvään lahonopeus vielä pylvään maaperän ja perustustavan iän keskiarvolla. Kun tämä oli tehty, laskettiin keskiarvot ja otoskeskihajonnat jokaisen maaperän ja perustustavan mukaan. Suhteelliset arvot saatiin, kun valittiin hitaimmin lahoava tekijä perusarvoksi johon muita tekijöitä verrattiin. Lahoamisnopeuksien vertailujen jälkeen piirrettiin rappeutumiskäyrät maaperien ja perustustapojen mukaan. Lopuksi tarkasteltiin vielä paikkakuntakohtaisia lahoamisnopeuksia.

Tuloksina saatiin merkittäviä eroja ympäristötekijöiden välillä. Tulokset olivat myös samansuuntaisia aikaisemman kokemuksen ja tutkimuksen kanssa. Nopeimmin lahoavat multaperäisessä maassa olevat pylväät. Savimaa / siltti ja hieno hiekka lahosivat seuraavaksi nopeimmin. Karkea hiekka / moreeni – maaperässä olevat pylväät lahosivat hieman hitaammin kuin edellä mainitut pylväät. Hitaimmin lahosivat kivitäyttö, turve ja kallio pylväät. Esimerkiksi multamaassa sijaitsevat pylväät lahoavat noin 1,5 kertaa nopeammin kuin kallio maassa sijaitsevat pylväät.

Merkittävimpänä tuloksena voitiin pitää perustustapojen lahoamisnopeuksien välillä löydettyjä suuria eroja. Taajama-, piha-, tie- sekä pelto perustustavoissa pylväät lahosivat huomattavasti nopeammin kuin metsä-, suo- tai kallioperusteiset pylväät.

Paikkakuntakohtaisissa lahoamisissa Kajaanin seudulla pylväät lahosivat kaikista nopeimmin. Tämä johtunee osittain aineiston alueen keskimääräistä korkeammasta keskiarvoisesta lämpötilasta ja sademäärästä sekä vesistöjen paljoudesta, jotka nopeuttavat lahoamista. Hitaimmin lahoamista tapahtui Hyrynsalmella.

Rappeutumiskäyrät piirrettiin iän funktiona aina 40 millimetriin saakka, jolloin pylväs pitäisi vaihtaa. Käyrien välillä käyttöiän loppupäässä oli usean vuoden eroja. Näihin tuloksiin kannattanee kuitenkin suhtautua harkiten, koska rappeutumiskäyriä piirrettäessä tehtiin paljon oletuksia.

Tämän diplomityön tuloksia voidaan käyttää sähköjakeluverkon kunnonhallinnan ja suunnittelun apuna. Esimerkiksi pylväiden lahoisuustarkastuksia voidaan paremmin ajoittaa ja kohdentaa, kun tiedetään kuinka lahoamiset eroavat ympäristötekijöiden mukaan. Näin pylväiden kunto ja jäljellä oleva käyttöikä tiedetään tarkemmin. Seurauksena tästä työturvallisuus paranee ja katkenneista pylväistä johtuvat kustannukset pienenevät.

Tutkimusta kannattaa jatkaa tarkentamalla esimerkiksi ilmastollisia tietoja kohdentamalla niitä pienemmälle alueelle. Lisäksi otoskokojen suurentaminen voisi antaa vielä tarkempia ja tilastollisesti merkitsevämpiä tuloksia. Ottamalla tutkimukseen mukaan myös iältään nuorempien ja vanhempien pylväiden, sekä jo käytöstä poistettujen pylväiden tiedot, voitaisiin muodostaa tarkempia rappeutumiskäyriä. Etenkin pylvään rappeutuminen käyttöiän loppupäässä voisi tarkentua huomattavasti. Tästä syystä myös käytöstä poistetuille pylväille kannattanee perustaa tietokanta, jos niin ei ole vielä tehty.

Lähteet

- [1] Clausen, C.A. Bacterial associations with decaying wood: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 1996, vol. 37, s. 101-107. DOI: 10.1016/0964-8305(95)00109-3.
- [2] Kärkkäinen, M. *Puun Rakenne Ja Ominaisuudet*. Helsinki: Metsäkustannus, 2007. 468 s. ISBN 978-952-5694-10-9.
- [3] Jääskeläinen, A. & Sundqvist, H. *Puun Rakenne Ja Kemia*. Helsinki: Otatieto, 2007. 142 s. ISBN 978-951-672-351-1.
- [4] Curling, S. & Clausen, C. A. & Winandy, J. E. The effect of hemicellulose degradation on the mechanical properties of wood during brown rot decay. 2001. Document IRG/WP, 01-20219, s.10. Viitattu 1.9.2014.
Saatavissa: <http://128.104.77.228/documnts/pdf2001/curli01a.pdf>.
- [5] Heijari, J. & Nerg, A. & Kaakinen, S & Vapaavuori, E. & Raitio, H. & Levula, T. & Viitanen, H. & Holopainen J. K. & Kainulainen P. Resistance of Scots pine wood to Brown-rot fungi after long-term forest fertilization. *Trees*, 2005, vol. 19, s. 729-735. ISSN 0931-1890.
- [6] Hughes, M. Decay, pests and prevention. Luentomateriaali. Aalto yliopisto. 10.10.2013. Viitattu 2.9.2014. Saatavissa: https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/puu-28.5000/luennot/Puu-28_5000_decay_pests_and_prevention.pdf.
- [7] Vuorinen, T. Puuaineksen tuhoutuminen, lahoaminen ja puun väri. Luentomateriaali. Aalto yliopisto. 17.2.2011. Viitattu 2.9.2014.
Saatavilla: https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/puu-19.1000/luennot/Puu-19_1000_puun_tuhoutuminen_lahoaminen_ja_puun_vari_.pdf.
- [8] Lahontorjuntayhdistys ry. & Posti- ja telehallitus & Puhelinlaitosten liitto ry. & Suomen sähkölaitosyhdistys ry. Puupylväiden kunnossapidon ja uusimisen perusteita. 1982. 55 s. ISBN 951-95740-1-8.
- [9] Pandey K. K. & Pitman A. J. FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 10, 2003, vol. 52, nro 3, s. 151-160. ISSN 0964-8305 DOI 10.1016/S0964-8305(03)00052-0.
- [10] Zabel, R. A. & Morrell J. J. *Wood Microbiology : Decay and its Prevention*. San Diego, CA: Academic Press, cop. 1992. 476 s. ISBN 9780323139465.
- [11] Boren, H. Tulevaisuuden sähköpylväs. Energiateollisuus ry / Sähkötutkimuspooli, 2010, s. 145. Viitattu 20.9.2014.
Saatavilla: http://energia.fi/sites/default/files/tulevaisuuden_sahkopylvaat_loppuraportti.pdf.

- [12] Edlund, M. & Jermer, J. Durability of heat-treated wood. Final Workshop COST Action E22. Environmental optimisation of wood protection. Lisboa Portugal, 22-23.3.2004.
- [13] Hirsi, H. Puun vauriomekanismit. Luentomateriaali. Aalto yliopisto, 2014. Viitattu 12.9.2014. Saatavissa: https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/rak-43.2300/luennot/Rak-43_2300_puun_vauriomekanismit.pdfhttps://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/rak-43.2300/luennot/Rak-43_2300_puun_vauriomekanismit.pdf.
- [14] Lehtonen, M. On the optimal strategies of condition monitoring and maintenance allocation in distribution systems. Probabilistic Methods Applied to Power Systems, International Conference, Stockholm, 2006, s 1-5. DOI: 10.1109/PMAPS.2006.360278.
- [15] Energiavirasto. Sähköverkkotoiminnan tunnusluvut vuodelta 2012. Verkkosivut. Päivitetty 24.9.2014. Viitattu 24.9.2014. Saatavissa: <http://www.energiavirasto.fi/sahkoverkkotoiminnan-tunnusluvut-vuodelta-20121>.
- [16] Energiateollisuus ry. Verkostosuositus RJ 33:09 Puupylväiden lahoisuustarkastus ja lujuuden määrittäminen. Energiateollisuus ry, Helsinki, 2009.
- [17] Energiateollisuus. Verkkosuositus RJ 33:09 Puupylväiden lahoisuustarkastus ja lujuuden määrittäminen. Energiateollisuus ry, Helsinki 2008.
- [18] Lohjala, J. Haja-asutusalueiden sähköjakelujärjestelmien kehittäminen - erityisesti 1000 V jakelujännitteen käyttömahdollisuudet. Väitöskirja, Lappeenranta teknillinen yliopisto, Lappeenranta, 2005. Viitattu 20.9.2014. ISBN 952-214-020-1.
- [19] Pesu, T. Puupylväiden kunnon ja lahoisuuden tarkastus RJ 33:96. Esitelmä. Kajaani, 14.12.2006.
- [20] Energiateollisuus ry. Verkon rakenne. Verkkosivut. Päivitetty 20.9.2014. Viitattu 20.9.2014. Saatavissa: <http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/verkon-rakenne>.
- [21] Heikkinen, P. Kuopion Energian sähköjakeluverkon kunnossapidon kehittäminen. Opinnäytetyö, Savonia-ammattikorkeakoulu, Kuopio, 2010. Viitattu 20.9.2014. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/7339>.
- [22] Refsnaes, S. & Rolfseng, L. & Solvang, E. & Heggset, J. Timing of wood pole replacement based on lifetime estimation. Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006. PMAPS 2006. International Conference , 2006, s. 1-8. DOI: 10.1109/PMAPS.2006.360286.
- [23] Korttesmaa, M. & Lehmus E. & Jämsä, S. Käytöstä poistettavien CCA -kylästyttävien puupylväiden uudelleen käyttö. VTT, 2004.
- [24] Hingston, J. A. & Collins, C. D. & Murphy, R. J. & Lester, J. N. Leaching of chromated copper arsenate wood preservatives: a review, Environmental Pollution, 2001, vol. 111, nro 1, s. 53-66. ISSN 0269-7491.

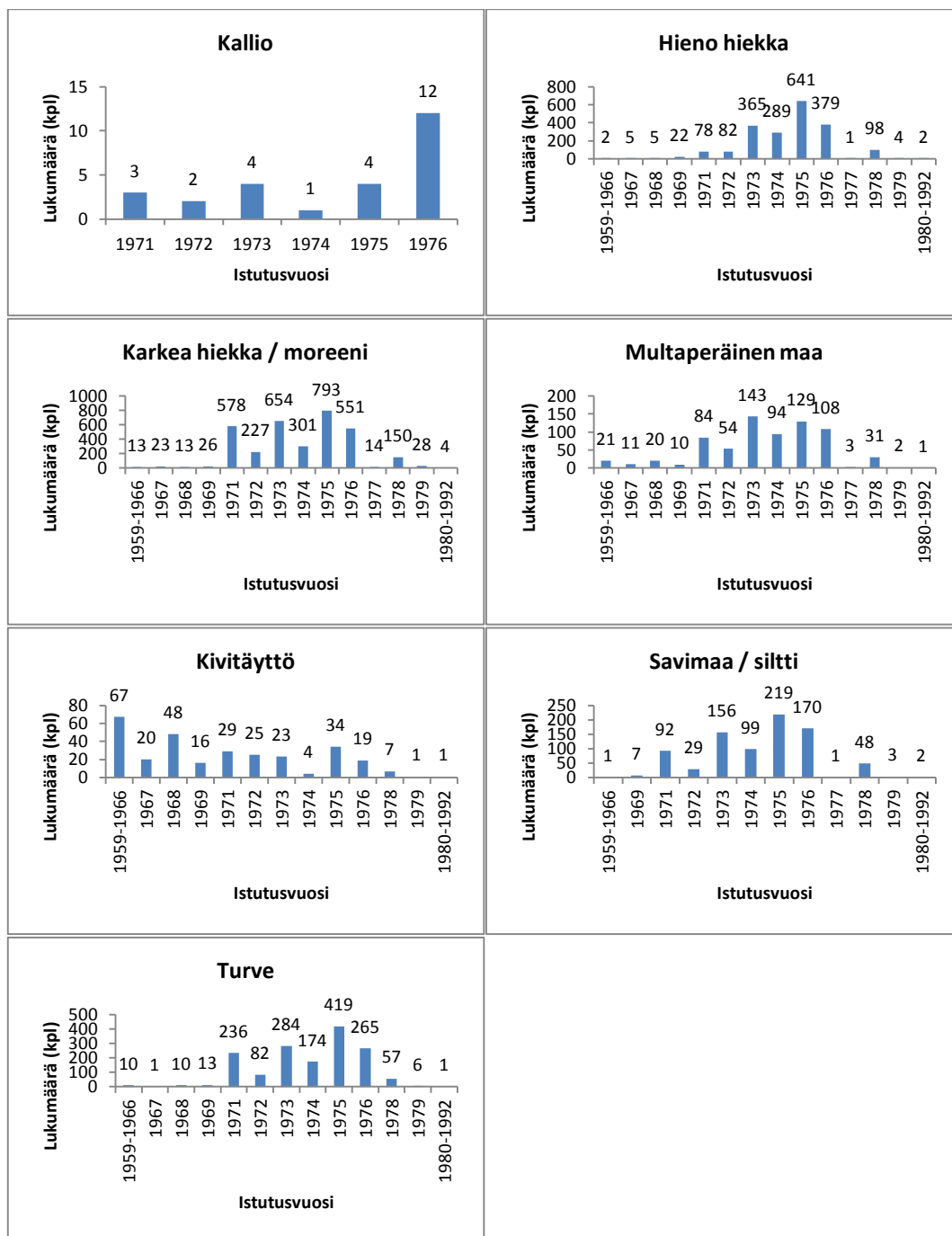
- [25] Työterveyslaitos. CCA-kyllästeen haittavaikutukset. Verkkosivut. Päivitetty 30.9.2014. Viitattu 30.9.2014. Saatavissa: <http://www.ttl.fi/ova/ccakyll.html>.
- [26] Arseenilla ja kromilla kyllästetyn puun käyttö ja hävitys. Päivitetty 19.6.2014. Viitattu 30.9.2014. Saatavissa: <http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Kemikaalit-biosidit-ja-kasvinsuojeluaineet/Biosidit/Biosidien-kayton-rajoitukset/Arseeni-ja-kromi/>.
- [27] Laine, J. Sähkönjakeluverkon komponenttien pitoajat. Diplomityö, Lappeenranta tekninen yliopisto, Energia- ja ympäristötekniikan osasto, Lappeenranta, 2005. Viitattu 20.9.2014. Saatavissa: <http://www.doria.fi/handle/10024/34432>.
- [28] TUKES. Hyväksytyt tehoaineet PT8. Verkkodokumentti. 2012. Saatavissa: http://www.tukes.fi/Tiedostot/Kemikaalituotteet/biosidit/hyv_tehoaineet/PT8_fi.pdf.
- [29] MTV3. Kreosootti terveydelle vaarallista - sähköpylväiden vuodot harvinaisia. Verkkosivut. Päivitetty 19.06.2013. Viitattu 1.10.2014. Saatavissa: <http://www.mtv.fi/uutiset/kotimaa/artikkeli/kreosootti-terveydelle-vaarallista-sahkopylvaiden-vuodot-harvinaisia/1910434>.
- [30] Työterveyslaitos. OVA-ohje: Kreosootti. Verkkosivut. Päivitetty 1.10.2014. Viitattu 1.10.2014. Saatavissa: <http://www.ttl.fi/ova/kreosootti.html>.
- [31] SFS 2662. Ilmajohdot. Puupylväs. Painos 3. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2004. 6 s.
- [32] SFS-EN 351-1. Durability of wood and wood-based products. Preservative-treated solid wood. part 1: Classification of preservative penetration and retention. Helsinki, Finnish Standards Association, 2007. 21 s.
- [33] SFS-EN 335. Puun ja puutuotteiden pitkäaikaiskestävyys. käyttöluokat: Määritelmät ja sovellutusalueet puulle ja puutuotteille. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2013. 14 s.
- [34] Rakennustieto. Kyllästetty puutavara. Ohjekortti RT 21-10880. 2006. Viitattu 2.10.2014. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/sahatavaranjatkojalosteet/RT%2021-10880.pdf>.
- [35] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Wood preservation manual, 1986. 159 s. Viitattu 2.10.2014. Saatavissa: <http://www.fao.org/docrep/015/an800e/an800e00.pdf>. ISBN 92-5-102470-7.
- [36] Vehviläinen, H. Modernin puunkyllästyslaitoksen automaatiojärjestelmän suunnittelu. Opinnäytetyö, Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, Automaatiotekniikka, Kotka, 2011. Viitattu 3.10.2014. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/35431>.
- [37] Nurmi, A. Puupylväiden Jälkisuojaus : Kirjallisuustutkimus. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1978. ISBN 9513807150.

- [38] Heikkilä, P. Sähköverkon kunnossapitojärjeselmän kehitys. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkötekniikka, Tampere, 2009. Viitattu 22.9.2014. Saatavissa: http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20dyot/Heikkila_P_aula_julk.pdf.
- [39] Horsman, S. Condition and design assessment of wood pole overhead lines. Improved Reliability of Woodpole Overhead Lines (Ref. no. 2000/031), IEEE Seminar, 2000, s. 3/1-3/8. Viitattu 23.9.2014. DOI: 10.1049/ic:20000177.
- [40] Auvinen, O. Condition monitoring of wooden poles. VTT, 2005. Viitattu 20.9.2014. Saatavissa: https://www.kth.se/polopoly_fs/1.132977!/Menu/general/column-content/attachment/AM_course_KHTTKK_2005.pdf.
- [41] Forestry tools. Kasvukaira. Verkkosivut. Päivitetty 29.9.2014. Viitattu 29.9.2014. Saatavissa: <http://www.forestrytools.com.au/index.php?id=197>.
- [42] Ilvesmäki, J. 0,4 kV ja 20 kV:n jakeluverkkojen tarkastustuottee. Opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu, Sähkötekniikka, Tampere, 2008. Viitattu 29.9.2014. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/9781>.
- [43] Inergia Oy. Lahokoiran käyttö Utsjoen linjantarkastuksissa. Verkkosivut. Päivitetty 27.8.2014. Viitattu 1.10.2014. Saatavissa: <http://www.inergia.fi/fi/index.php?komento=uutiset&arvo=90>.
- [44] Inergia Oy. Lahokoiran käyttö Utsjoen linjantarkastuksissa. Verkkosivut. Päivitetty 2.9.2013. Viitattu 1.10.2014. Saatavissa: http://www.inergia.fi/vaihtokuvat/Tarkastus_2.JPG.
- [45] Rovakaira Oy. Vuosikertomus 2009. Viitattu 1.10.2014. Saatavissa: <http://www.rovakaira.fi/loader.aspx?id=bf23628b-ab4f-4397-98aa-c830b382a41f>.
- [46] Tallavo F. J. New Methodology for the Assessment of Decayed Utility Wood Poles using Ultrasonic Testing. Väitöskirja, University of Waterloo, Civil Engineering, Waterloo, Canada, 2009. Viitattu 2.10.2014. Saatavissa: <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/4588>.
- [47] Senalik, A. & McGovern, M. & Beall, F. C. & Reis, H. Detection and Assessment of Decay in Wooden Utility Poles Using an Acoustic Approach. International Journal of Environmental Protection, 2013. Vol. 3 nro 8, s. 13-28. ISSN 2226-6437.
- [48] Schad, K. C. & Schmoldt, D. L. & Ross, R. J. Nondestructive Methods for Detecting Defects in Softwood Logs. USDA Forest Service Research Paper FPL-RP-546. 1996, 13 s. Viitattu 3.10.2014. Saatavissa: <http://www.treearch.fs.fed.us/pubs/97>.
- [49] Bhuyan, G. S. Condition based serviceability and reliability assessment of wood pole structures. Transmission & Distribution Construction, Operation & Live-Line Maintenance Proceedings, 1998. ESMO '98. 1998 IEEE 8th International Conference. 1998, s. 333-339. Viitattu 10.10.2014. DOI: 10.1109/TDCLLM.1998.668401.

- [50] Vidor, F. L. R. & Pires, M. & Dedavid, B. A. & Montani, P. D. B. & Gabiatti, A. Inspection of Wooden Poles in Electrical Power Distribution Networks in Southern Brazil. Power Delivery, IEEE Transactions, 2010, vol. 25, s. 479-484. Viitattu: 14.10.2014. DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2034913.
- [51] Welte, T. M. & Kile, H. Parameter estimation in degradation modelling: A case study using condition monitoring data from wood pole inspections. PowerTech, 2011 IEEE Trondheim, 2011, s. 1-7. Viitattu 25.10.2014. DOI 10.1109/PTC.2011.6019168.
- [52] Yuan Li, & Yeddanapudi, S. & McCalley, J. D. & Chowdhury A. A. & Moorehead, M. Degradation-path model for wood pole asset management. Power Symposium, 2005. Proceedings of the 37th Annual North American, 2005, s. 275-280. Viitattu 25.10.2014. DOI: 10.1109/NAPS.2005.1560538.
- [53] Auvinen, O. Wood pole condition management and transformer failure rate assessment in finnish electricity distribution utilities. Raportti. VTT, Helsinki, 2004.
- [54] Goodman J. R. & Stewart, A. Wood pole management-utility case studies. Power Delivery, IEEE Transactions, 1990, vol. 5, s. 422-426. Viitattu 25.10.2014. DOI: 10.1109/61.107307.
- [55] Stewart A. & Goodman, J. R. Life cycle economics of wood pole utility structures. Power Delivery, IEEE Transactions, 1990, vol. 5, pp. 1040-1046. Viitattu 25.10.2014. DOI: 10.1109/61.53119.
- [56] Datla, S. V. & Pandey, M. D. Estimation of Life Expectancy of Wood Poles in Electrical Distribution Networks. Structural Safety, 7, 2006, vol. 28, nro. 3. s. 304-319. Viitattu 25.10.2015. DOI: 10.1016/j.strusafe.2005.08.006 ISSN 0167-4730.
- [57] Ilmatieteenlaitos. Vuositilastot. Verkkosivut. Päivitetty 13.3.2015. Viitattu 13.3.2015. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot>.
- [58] Loiste Oy. Sähkönjakelukartta. Verkkosivut. Päivitetty 30.1.2015. Viitattu 30.1.2015. Saatavissa: <http://hairioinfo.loiste.fi/Keskeytyskartta/outagemap.html>.
- [59] Laininen, P. Tilastollisen Analyysin Perusteet. 3. korj. p. ed. Helsinki: Otatieto, 2004. ISBN 951-672-339-X.

Liitteet

Liite A



Liite A.1: Aineiston pylväiden istutusvuodet maaperittäin. Pylväiden ikäjakamat ovat kuvasta päätellen hyvin erilaiset. Tämä on otettu tutkimuksessa huomioon.

Liite B

Liite B.1: Taulukkona esitetyt tuloksena saadut maaperien ja perustustapojen suhteelliset lahoamisnopeudet, kun kallio kalliopylväs metsämaa on valittu perusarvoksi.

Maaperä / Perustus	Suhteellinen lahoamisnopeus							
	Kalliopylväs metsämaa	Maapylväs metsämaa	Maa-pylväs pelto	Maapylväs puutarha / piha	Maapylväs suo	Maapylväs taajama / kaava-alue	Maapylväs tiealue	Yhteensä painotettu keskiarvo
Kallio	1,0000							1,0000
Turve		1,1831	1,1655		1,1850			1,1836
Kivitäyttö	1,1522	1,1734	1,5141					1,2076
Karkea hiekka / moreeni	1,1841	1,2452	1,3080	1,3936		1,4835	1,2121	1,2485
Savimaa / siltti		1,2585	1,4903		1,1859			1,2596
Hieno hiekka	1,1497	1,2538	1,6229	1,5412	1,2465	1,3730		1,2628
Multaperäinen maa		1,3681	1,5596	1,7590		1,5210		1,4866

Liite B.2: Taulukkona esitetyt tuloksena saadut maaperien ja perustustapojen otoskeskihajonnat suhteellisen lahoamisnopeuden mukaan, kun kallio kalliopylväs metsämaa on valittu perusarvoksi.

Maaperä / Perustus	Otoskeskihajonnat suhteellisen lahoamisnopeuden mukaan							
	Kalliopylväs metsämaa	Maapylväs metsämaa	Maa-pylväs pelto	Maapylväs puutarha / piha	Maapylväs suo	Maapylväs taajama / kaava-alue	Maapylväs tiealue	Yhteensä painotettu keskiarvo
Kallio	0,9694							0,9694
Turve		0,5398	0,5029		0,5626			0,5473
Kivitäyttö	0,3567	0,5013	0,6963					0,5232
Karkea hiekka / moreeni	0,4567	0,5289	0,4334	0,8129		0,7973	0,4134	0,5335
Savimaa / siltti		0,4203	0,5266		0,5573			0,4323
Hieno hiekka	0,4523	0,5514	0,8142	0,8286	0,5445	0,5650		0,5612
Multaperäinen maa		0,6291	0,7248	0,7824		0,8506		0,6996

Liite C

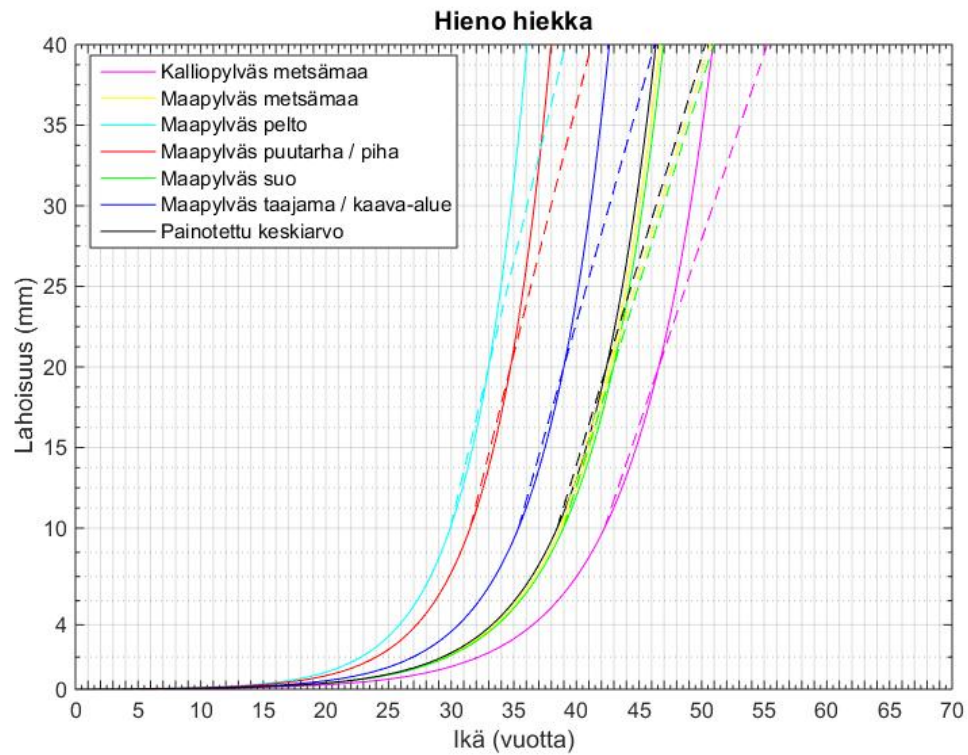
Liite C.1: Rappeutumiskäyrien vakiot kun käyrät noudattavat eksponentiaalista muotoa. Vakiot on saatu MATLAB ohjelman fit-funktion avulla.

Käyrien eksponenttifunktioiden vakiot a ja b: $Lahoisuus(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$, jossa x=ikä									
Maaperä	Kalliopylväs metsämaa	Maapylväs metsämaa	Maapyl- väs pelto	Maapylväs puutarha/piha	Maapyl- väs suo	Maapylväs taajama / kaava-alue	Maapyl- väs tiealue	Yhteensä	Vakio
Hieno hiekkä	0,01161	0,01161	0,01161	0,01161	0,01161	0,01161		0,01161	a
	0,16	0,1745	0,2259	0,2145	0,1735	0,1911		0,1757	b
Kallio	0,01161							0,01161	a
	0,1388							0,1388	b
Karkea hiekkä / moreeni	0,01161	0,01161	0,01161	0,01161		0,01161	0,01161	0,01161	a
	0,1648	0,1733	0,182	0,1939		0,2064	0,1687	0,1737	b
Kivi- täyttö	0,01161	0,01161	0,01161					0,01161	a
	0,1604	0,1633	0,2107					0,1681	b
Multa- peräinen maa		0,01161	0,01161	0,01161		0,01161		0,01161	a
		0,1904	0,217	0,2448		0,2117		0,2069	b
Savimaa / siltti		0,01161	0,01161		0,01161			0,01161	a
		0,1751	0,2074		0,165			0,1753	b
Turve		0,01161	0,01161		0,01161			0,01161	a
		0,1646	0,1622		0,1649			0,1647	b

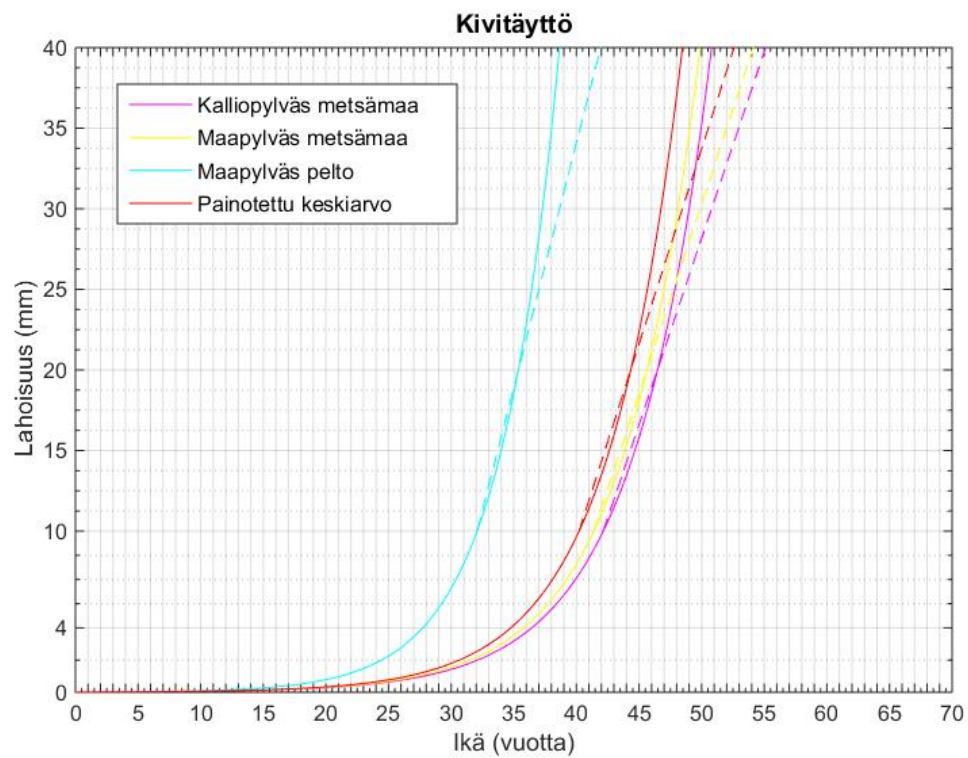
Liite C.2: Rappeutumiskäyrien vakiot kun käyrät noudattavat lineaarista muotoa. Vakiot on saatu MATLAB ohjelman fit-funktion avulla. Rappeutumiskäyrä alkaa kun lahoisuus on 10 millimetriä.

Käyrien lineaarifunktioiden vakiot: $\text{Lahoisuus}(x)=a \cdot x - b$									
Maaperä	Kalliopylväs metsämaa	Maapylväs metsämaa	Maapylväs pelto	Maapylväs puutarha / piha	Maapylväs suo	Maapylväs taajama / kaava-alue	Maapylväs tiealue	Yhteensä	$f(x) \geq 10$
Hieno hiekka	2,3082	2,52	3,2583	3,0941	2,50	2,76		2,54	a
	-87,500	-87,500	-87,500	-87,500	-87,500	-87,500		-87,500	b
Kallio	2,0025							2,0025	a
	-87,500							-87,500	b
Karkea hiekka / moreeni	2,3772	2,5000	2,6261	2,7979		2,9783	2,4334	2,5065	a
	-87,500	-87,500	-87,500	-87,500		-87,500	-87,500	-87,500	b
Kivi-täyttö	2,3133	2,3558	3,0398					2,4245	a
	-87,500	-87,500	-87,500					-87,500	b
Multa-peräinen maa		2,7468	3,1311	3,5314		3,0537		2,9847	a
		-87,500	-87,500	-87,500		-87,500		-87,500	b
Savimaa / siltti		2,5266	2,9920		2,3809			2,5288	a
		-87,500	-87,500		-87,500			-87,500	b
Turve		2,3753	2,3399		2,3790			2,3763	a
		-87,500	-87,500		-87,500			-87,500	b

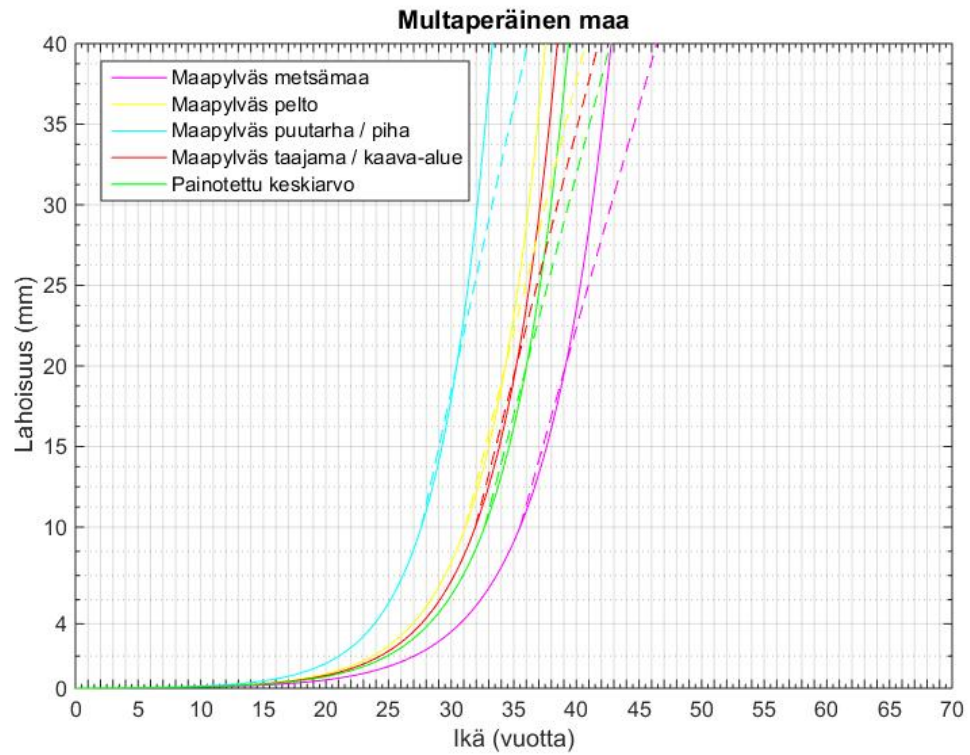
Liite D



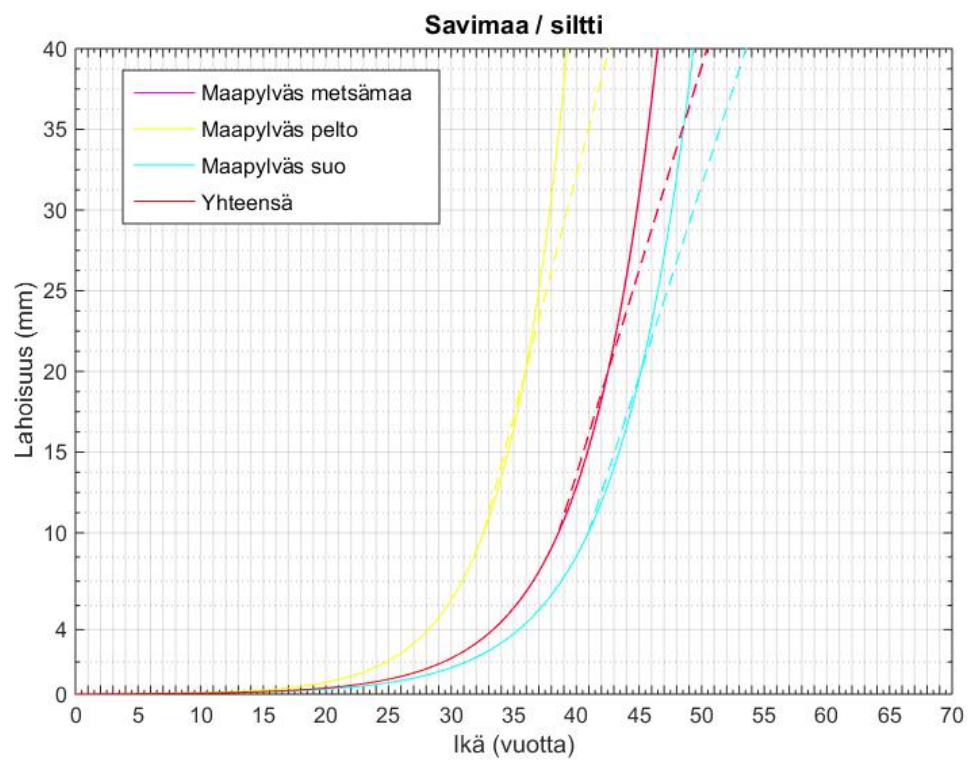
Liite D.1: Rappeutumiskäyrät maaperän hieno hiekka eri perustustavoille.



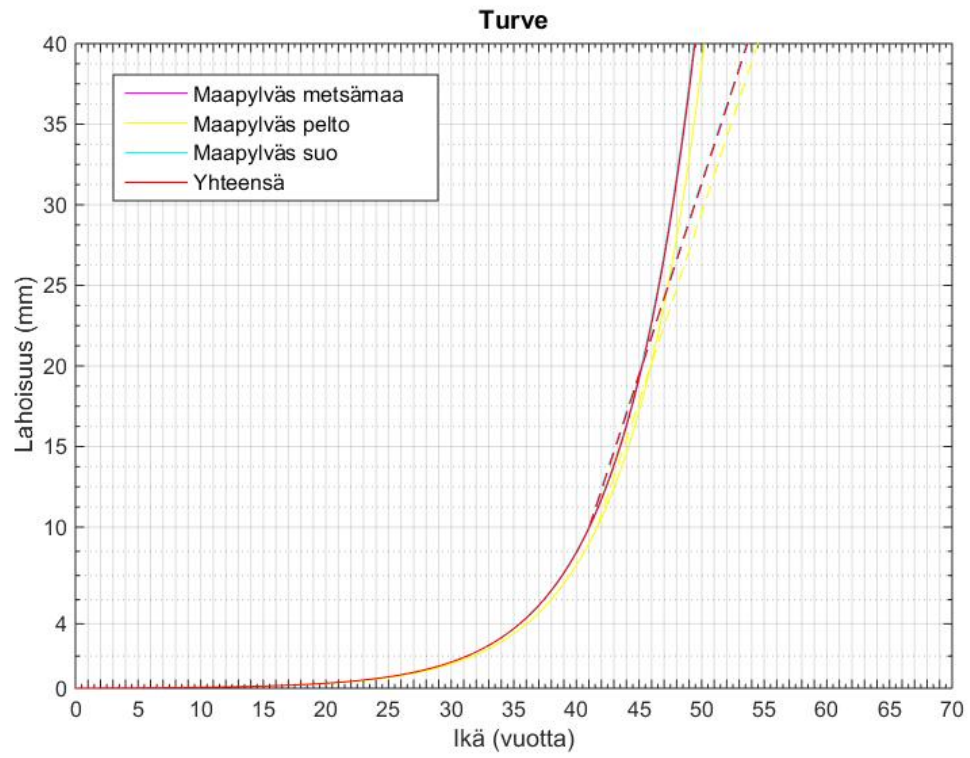
Liite D.2: Rappeutumiskäyrät maaperän kivitäyttö eri perustustavoille.



Liite D.3: Rappautumiskäyrät maaperän multaperäinen maa eri perustustavoille.



Liite D.4: Rappautumiskäyrät maaperän savimaa / siltti eri perustustavoille.



Liite D.5: Rappautumiskäyrät maaperän turve eri perustustavoille.